

E.T.S. de Ingeniería Industrial,
Informática y de Telecomunicación

Estudio de la red de tierras de un parque eólico



Máster Universitario en
Ingeniería Industrial

Trabajo Fin de Máster

Autor: Iker López de Munáin Díaz

Director: Vicente Senosiain

Codirector: Mikel Rodríguez

Pamplona, 24/06/2016

Resumen

Con la demanda de generación de energía renovable y el aumento concienciación de la sociedad hacia una alternativa viable a la convención térmica y nuclear actual para contribuir a mejorar el medioambiente, la generación eólica ha sido un mercado creciente en el último par de décadas. Esta tecnología es relativamente nueva en comparación con las tecnologías convencionales y por lo tanto, se presentan varios desafíos. Esta investigación se centra en el diseño de sistemas de puesta a tierra para los parques eólicos y los procedimientos para la reducción de cualquier corriente de fallo y en consecuencia, para reducir las grandes tensiones que surgen en el lugar, ya se convierten en una amenaza para la vida útil de los equipos y para la seguridad humana.

Este proyecto analiza los parques eólicos de Calango 6, Santana I y Santana II, situados en Rio Grande de Norte, en Brasil. El diseño de la malla de tierra de los mismos debe ser el óptimo para satisfacer con las condiciones de la norma IEC 61936-1 y hacer que las tensiones de paso y de contacto no sean peligrosas para las personas ni equipos que haya en el lugar.

El logro de todos los objetivos establecidos antes de comenzar el proyecto hace que esta investigación pueda considerarse un éxito.

Abstract

With the demand for renewable power generation increasing and with public pressure stressing a viable alternative to the current thermal and nuclear convention, wind generation has been a growing market in the last couple of decades. This technology is relatively new when compared to the latter implementations and it therefore comes with several challenges. This investigation focusses on designing earthing systems for these wind farm sites and the procedures behind reducing any fault current and consequently large potentials that arise on site and become a threat to human life and damage equipment on site.

This project analyzes Calango 6, Santana I and Santana II wind farms, located in Rio Grande do Norte, in Brazil. The ground design of those wind farms must be the optimal to satisfy the IEC 61936-1 conditions and to make a safety area for the people and equipment on site verifying the touch and step potentials.

The achievement of all the objectives established prior to commencing the project suggests this investigation can be considered successful.

Índice

1. Introducción	1
1.1 Descripción del proyecto.....	2
1.2 Propósitos y objetivos	4
2. Revisión de la bibliografía	5
2.1 Resistencia y resistividad del suelo	5
2.2 Diseño de la malla de tierra.....	7
2.3 Distribución de la corriente de falta.....	8
2.4 Tensiones significativas en los diseños de puesta a tierra	9
2.4.1 Elevación del potencial de tierra (RoEP)	9
2.4.2 Tensiones de paso y de contacto	9
2.5 Protección contra rayos	11
3. Comparación de los softwares disponibles.....	12
3.1 ETAP.....	12
3.2 WinIGS.....	13
3.3 CDEGS.....	14
3.4 Elección.....	16
4. Estudio de los Parques Eólicos de Calango 6, Santana I y Santana II.....	17
4.1 Modelo de suelo y datos de resistividad de los parques eólicos	18
4.2 Diseño de la malla de tierra.....	22
4.2.1 Puesta a tierra de los aerogeneradores	22
4.2.2 Puesta a tierra de las subestación.....	24
4.2.3 Interconexión de los parques y los aerogeneradores	25
4.3 Análisis de la corriente de falta	26
4.4 Determinación de la elevación del potencial de tierra	27
4.5 Evaluación de la tensión de paso y de contacto	31
5. Conclusiones.....	34
6. Líneas Futuras.....	37
7. Referencias.....	39
8. Anexos	41

Índice de figuras

Figura 1: Diagrama de flujo para el diseño óptimo de la malla de tierra.....	2
Figura 2: Diagrama unifilar simplificado de los parques eólicos Calango 6, Santana I y Santana II. Partición en barras de 34.5 kV operando normalmente abierto	3
Figura 3: Técnicas de medida de resistividad de Wenner y Schlumberger, respectivamente	6
Figura 4: Distribución de la corriente de una falta monofásica del parque eólico	8
Figura 5: Tensiones de paso y de contacto	10
Figura 6: Simulación del software ETAP	12
Figura 7: Interfaz del software WinIGS	13
Figura 8: Simulación del software CDEGS	14
Figura 9: Pantalla principal del software CDEGS.....	16
Figura 10: Ampliación del diagrama unifilar simplificado de los parques eólicos Calango 6, Santana I y Santana II. Partición en barras de 34.5 kV operando normalmente abierto	17
Figura 11: Modelo del suelo del aerogenerador 6 del parque eólico Calango 6	19
Figura 12: Sistema de puesta a tierra de los aerogeneradores	23
Figura 13: Modelo de la turbina para las simulaciones	24
Figura 14: Sistema de puesta a tierra de la subestación.....	25
Figura 15: Modelo global de puesta a tierra de los parques eólicos	26
Figura 16: Tensión de paso permitida.....	28
Figura 17: Simulación en CDEGS de la elevación del potencial de tierra de los parques eólicos.....	29
Figura 18: Informe de la simulación en CDEGS de la elevación del potencial de tierra de los parques eólicos	30
Figura 19: Simulación de la tensión de contacto del aerogenerador 6 del parque eólico Calango 6 utilizando CDEGS.....	31
Figura 20: Simulación de la tensión de contacto de la subestación utilizando CDEGS.....	32
Figura 21: Simulación de la tensión de paso de la subestación utilizando CDEGS	33
Figura 22: Tensión de paso permitida con las especificaciones de este proyecto	35
Figura 23: Software WinIGS, interfaz principal.....	38

Índice de tablas

Tabla 1: Valores típicos de resistividad de diferentes terrenos..... 5

Tabla 2: Valores de resistividad y profundidad de las capas de los aerogeneradores, estaciones meteorológicas, parques y conjunto de parques utilizando CDEGS..... 22

1. Introducción

Con los consumidores cada vez más conscientes sobre el cambio climático, ha habido un mayor enfoque en el cambio hacia las energías renovables. Cuando esto no es posible, entonces las empresas tratan de hacer que sus productos sean lo más energéticamente eficiente posible. La industria del automóvil, por ejemplo, está completamente orientado a hacer los coches de combustión lo más eficientes e invierten grandes cantidades de dinero para vencer a la competencia en esta investigación.

La misma tendencia se observa en la generación de energía. La opción renovable todavía ocupa una parte relativamente baja en la producción total de electricidad debido al hecho de que todavía se considera una tecnología relativamente nueva en comparación con las convencionales. También, se cree que la última tiene una densidad de energía significativamente más grande. Sin embargo, la presión pública para llevar a cabo un enfoque más considerado con el medio ambiente ha dado lugar a un cambio de política por la cual las empresas de generación de energía investigaron cómo las opciones renovables podrían mejorar la red y esto condujo a un aumento en la construcción de parques eólicos. Como resultado de esta popularidad aumentada, se ha producido un aumento en la inversión tanto de parques onshore como offshore. Hay varios desafíos en la construcción de un parque eólico y esto es debido a que es una tecnología poco madura en la generación de energía en comparación con la generación de energía térmica y nuclear convencional. Uno de los retos consiste en el diseño del sistema de puesta a tierra de los parques eólicos.

El estudio de los diseños de puesta a tierra puede ser considerado por sí mismo un área específica de investigación que requiere una atención especial, ya que es en última instancia responsable de la seguridad de las personas en las inmediaciones del parque eólico [1] [2] y, esencialmente, protege cualquier equipo [3] de posibles corrientes de defecto que puedan surgir y de la caída de rayos.

Además de encontrar este tema de gran relevancia desde un punto de vista académico, el punto de vista industrial es igualmente interesante. A través de esta investigación, el ámbito industrial queda reflejado en todas partes, ya que se debe intentar reducir el cobre empleado para el sistema de puesta a tierra y así reducir los costos. Por otro lado, la parte técnica es muy importante así como la legislativa, debido a que hay una serie de normas que se deben cumplir para llevar a cabo este proyecto.

1.1 Descripción del proyecto

El presente proyecto intenta evaluar la importancia y los principios que se encuentran detrás de diseñar un sistema de puesta a tierra eficaz para aerogeneradores y subestaciones. Además, las empresas se centran en resolver problemas como el daño que una posible corriente de defecto en el emplazamiento del parque eólico o incluso un rayo puede causar en el equipo. Es todo una cuestión de seguir las normas y reglamentos impuestos por International Electrotechnical Commission (IEC) o por el Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). Por otro lado, de cara a las empresas es un aspecto a tener en cuenta, ya que ayuda a evitar costes innecesarios en el futuro si la vida de una persona está en riesgo o incluso los equipos del lugar están dañados debido a un fallo.

Hay tres consideraciones principales al diseñar un sistema de puesta a tierra adecuado. La primera, consiste en la medición de la resistividad del suelo del sitio. Después de recoger esta información en el emplazamiento y en consecuencia determinar modelo de suelo de varias capas, el diseño de la malla de tierra se ajusta con el fin de obtener la impedancia total del parque eólico. Esta impedancia se utiliza para determinar la elevación del potencial de tierra (RoEP), es decir, la tensión máxima que puede surgir en el sitio durante una falta fase-tierra. De acuerdo con la norma IEC 61936-1, la elevación del potencial de tierra se define como "la tensión entre el sistema de tierra y una tierra de referencia" [4]. Esta es la segunda consideración principal en un diseño de puesta a tierra.

La consideración final implica la combinación de la elevación del potencial de tierra con el diseño de malla de la tierra con el fin de encontrar las tensiones de paso y contacto. El proceso de diseño de puesta a tierra se puede observar a continuación en el diagrama de flujo.

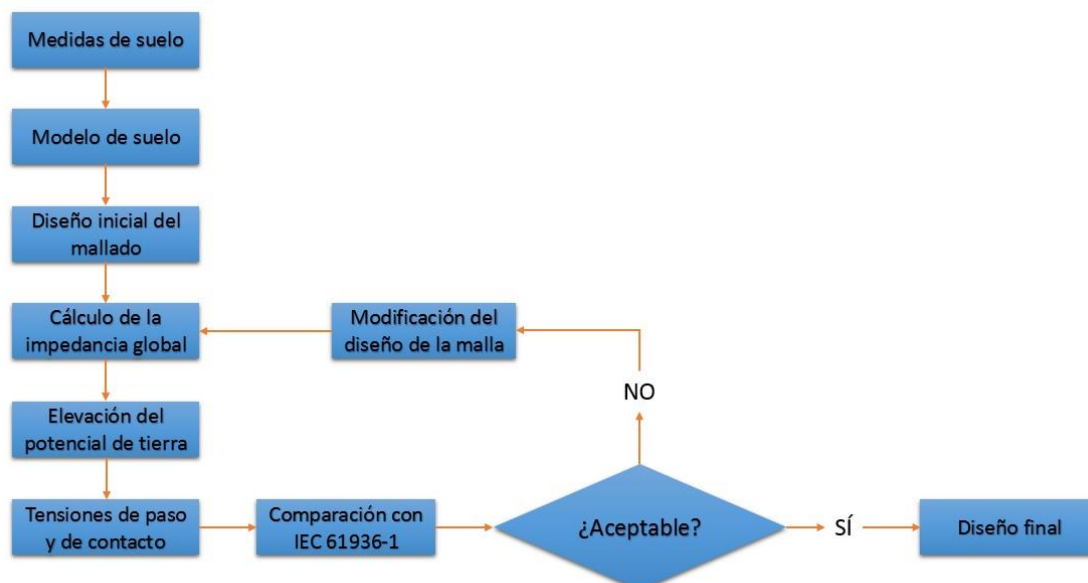


Figura 1: Diagrama de flujo para el diseño óptimo de la malla de tierra

Cabe destacar que el diseño de la malla de puesta a tierra es un proceso iterativo mediante el cual se determina un diseño inicial y se comprueba si la salida es aceptable, es decir, si la tensión de contacto y de paso se ajusta a los límites tolerables, si no el diseño tendrá que ser modificado.

Este informe aborda el caso de la subestación transformadora SE Calango 245, que evacúa la potencia generada en los parques Calango 2, Calango 4 y Calango 5. Dicha evacuación se realiza a través de un transformador 69 kV / 34,5 kV - 80/100 MVA. La conexión de SE Calango 245 se realiza directamente por conexión al nivel de tensión de 69 kV de la subestación SE Lagoa Nova II, a través de una línea de 5,62 km. Una ampliación de la barra de 34,5 kV que evacúa los parques Calango 2, 4 y 5 y un transformador adicional 69 kV / 34,5 kV - 80/100 MVA servirán para evacuar los parques Calango 6, Santana I y Santana II. La Figura 2 muestra el diagrama unifilar simplificado. La partición de barras operará normalmente abierta.

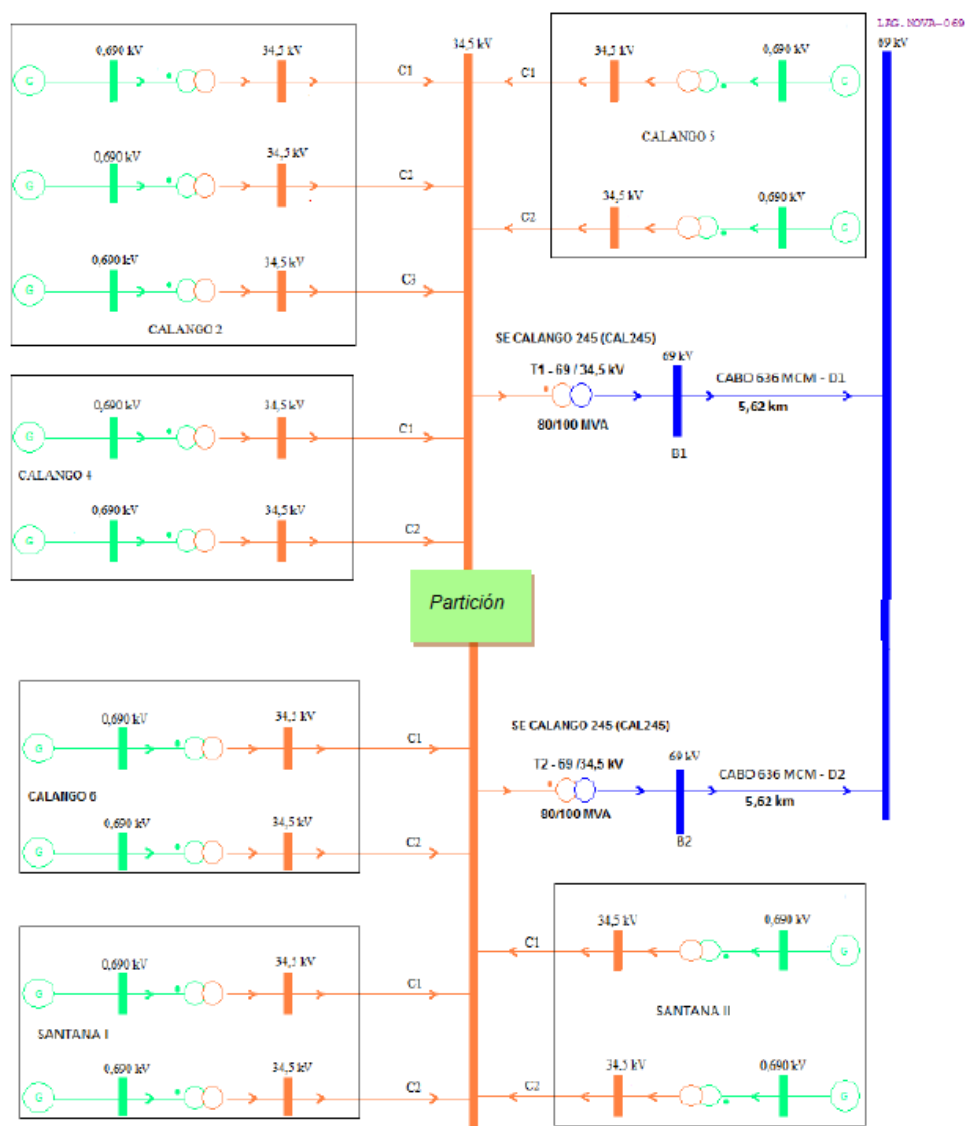


Figura 2: Diagrama unifilar simplificado de los parques eólicos Calango 6, Santana I y Santana II. Partición en barras de 34,5 kV operando normalmente abierta

1.2 Propósitos y objetivos

Antes de emprender cualquier proyecto de hitos significativos se debe establecer la definición de las principales tareas que deben ser realizadas. Hay tres partes principales en este proyecto. La primera etapa consiste en la identificación del modelo global del suelo del emplazamiento del parque eólico a través de las mediciones de resistividad obtenidos. Posteriormente, la elevación del potencial de tierra se puede determinar mediante la aplicación de la corriente de fallo conocido a través de la impedancia calculada del sistema. La elevación del potencial de tierra es tremendamente importante en el diseño de sistemas de puesta a tierra, ya que establece la tensión máxima que puede surgir en el sitio. La tercera y última etapa consiste en calcular las tensiones de paso y contacto y así cumplir con las condiciones de la norma IEC 61936-1. Toda instalación eléctrica debe disponer de una protección o instalación de tierra diseñada de forma tal que, en cualquier punto normalmente accesible del interior o exterior de la instalación eléctrica donde las personas puedan circular o permanecer, y exista el riesgo de que puedan estar sometidas a una tensión peligrosa durante cualquier defecto en la instalación eléctrica o en la red unida a ella, estas queden protegidas.

De esta manera, se presentan 2 objetivos relevantes, que son; por un lado, la validación de la malla de tierra proyectada para los parques eólicos Calango 6, Santana I y Santana II; y por otro, la elección de un software que permita realizar el análisis y ejecutarlo, tal y como se ha comentado anteriormente, basando el análisis en la IEC 61936-1. Mediante estos objetivos se cumplen los hitos anteriormente mencionados. Como retos secundarios se podrían considerar:

- Mejorar el conocimiento en el diseño de sistemas de puesta a tierra.
- Ganar experiencia con el software de puesta a tierra de Current Distribution, Electromagnetic interference, Grounding, and Soil analysis package (CDEGS).
- Adquirir experiencia en el tratamiento de las solicitudes de cliente.
- Utilizar consideraciones prácticas en los diseños teóricos.

2. Revisión de la bibliografía

2.1 Resistencia y resistividad del suelo

La base de cualquier diseño de puesta a tierra es obtener principalmente mediciones precisas del sitio y esto incluye mediciones de la resistencia del suelo. El primer parámetro es particularmente relevante para los diseños de puesta a tierra, ya que es directamente proporcional a la resistividad del suelo. El propósito de llevar a cabo mediciones de resistividad del suelo es para llegar a un modelo preciso de la estructura del suelo en el lugar que cuenta con múltiples capas de resistividad, es decir, la teoría de múltiples capas. El valor de la resistividad (medida en ohm-metros, $\Omega\cdot m$) está influenciado por dos factores principales, la porosidad del suelo y la concentración de electrolitos, ya que existe agua en el suelo [5].

La resistividad determina la capacidad de una propiedad de conducir la electricidad. Buenos conductores se consideran esos que tienen una baja resistencia, ya que no imponen grandes dificultades al flujo de corriente. Del mismo modo, estos materiales tienen baja resistividad debido a la proporcionalidad directa con la resistencia del material [6].

Una medición precisa de la resistencia del suelo y por consiguiente, su resistividad, es de suma importancia. Valores incorrectos pueden llevar a diseños inadecuados y pueden tener efectos dañinos tanto las personas como en los equipos del lugar. La resistividad del suelo puede variar significativamente dependiendo de la naturaleza del terreno local. A continuación, se muestran valores de resistividad típicos de diferentes materiales de tierra.

Type	Resistivity ($\Omega\cdot m$)
Sea Water	0.1-10
Clay	8-70
Shale, Slate, Sandstone	10-100
Sand	200-3000
Ridge Gravel	3000-30000
Solid Granite	10000-50000
Ice	10000-100000

Tabla 1: Valores típicos de resistividad de diferentes terrenos

Hay dos métodos principales para medir la resistividad de un terreno en el lugar, los métodos de Wenner y Schlumberger [7]. El propósito de estas mediciones es determinar el tipo de suelo que está presente en el sitio, que se denota por el valor de la resistividad, y el número de capas que están presentes en el subsuelo. El método Wenner es la técnica más común y, además de ser relativamente simple de realizar, permite analizar con bastante precisión mediante la inserción de picas de tierra en la superficie. Este procedimiento comprende la inserción de cuatro picas que son equidistantes "a" metros de distancia. Las dos internas se conocen como picas de tensión (P1 y P2), mientras que las exteriores son las picas de corriente (C1 y C2). La Figura 3 muestra esta disposición.

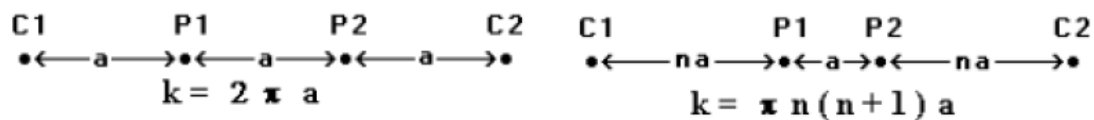


Figura 3: Técnicas de medida de resistividad de Wenner y Schlumberger, respectivamente

El método Schlumberger, por otra parte, a pesar de tener un diseño muy similar a la disposición Wenner tiene las picas de tensión en el interior a una distancia "a" y las picas de corriente en el exterior a una distancia "na" superior. Esta técnica es más apropiada para áreas más pequeñas de suelo. Sin embargo, los estudios de puesta a tierra requieren el análisis de grandes áreas y por lo tanto, el método Wenner sigue siendo la mejor opción, ya que proporciona un promedio de la zona en cuestión. Mediante la determinación de la resistencia aparente por medio de la división de la diferencia de tensión a través de la corriente medida entre las picas ($R_{app} = \Delta V / I$), la resistividad aparente se puede calcular utilizando las siguientes ecuaciones.

$$\text{Wenner: } \rho_{app} = R_{app} \cdot 2\pi \cdot a$$

$$\text{Schlumberger: } \rho_{app} = R_{app} \cdot \pi na \cdot (n + 1)$$

Esta investigación se centra en el análisis de las mediciones del suelo que se han obtenido mediante el método de Wenner.

2.2 Diseño de la malla de tierra

Tal y como se ha mostrado en el diagrama de flujo en la Figura 1, es evidente que el diseño de la malla de tierra es de gran importancia. El diseño evalúa una variedad de parámetros relacionados con el emplazamiento, desde el área que cubre, pasando por la impedancia total de la red, hasta el tipo de cables utilizados y sus respectivas características [8]. La impedancia de la red es una relación entre la zona cubierta y la resistividad del suelo [9]; de hecho, cuanto mayor sea el área, mayor es la malla de la tierra y por lo tanto menor es la impedancia.

La malla de la tierra se utiliza para proporcionar trayectoria de baja resistencia para la corriente de defecto para volver al origen y que no perjudique a las personas, ni ocasione daños en los equipos del lugar. La malla de la tierra en sí es la disposición física del cobre que conecta las estructuras del lugar y las pantallas de los cables que siguen estos conductores de cobre. Cuantas más pantallas y cables de cobre se utilicen, menor es la impedancia, ya que esto ayuda a disipar mejor la corriente. La impedancia de la red depende de la disposición del cobre y de las características de resistividad del suelo. Como se ha mencionado anteriormente, los sitios de resistividad más altos tienen una resistencia más alta y por lo tanto no son tan eficaces en la disipación de la corriente de defecto. La razón por la cual se utilizan pantallas de los cables es precisamente para reducir la impedancia global del área.

Para hacer el diseño de malla de la tierra se utiliza varias fórmulas para determinar la impedancia de tierra y las tensiones que surgen en el lugar. Para los diseños básicos tales como subestaciones que son generalmente rectángulo o unas estructuras cuadradas, estos cálculos pueden realizarse de forma manual, sin embargo, las trayectorias de los cables de cobre que rodean el parque eólico tienen forma muy irregular y por lo tanto se requieren simulaciones por ordenador para llevar a cabo el diseño de puesta a tierra con mayor precisión. Los principios esbozados que se centran en el diseño de sistemas de puesta a tierra para subestaciones de corriente alterna se encuentran en la norma IEC 61936-1 [4].

El diseño de puesta a tierra puede ir desde esbozar los tramos de cobre a lo largo del parque eólico hasta el cálculo de las dimensiones de los conductores de cobre que deben tener con el fin de transferir la corriente de fallo en caso de producirse. En este caso, la corriente de falta ya viene dada como dato, que más adelante se analizará.

El diseño de puesta a tierra evalúa estructuras que están unidas al propio sistema, en este caso, los aerogeneradores y la subestación. Al realizar el diseño general de una puesta a tierra, es aconsejable colocar la malla a un metro de distancia del perímetro de cualquier estructura que se va a unir al sistema de puesta a tierra. De esta manera, se reduce la tensión de contacto en caso de que alguien pueda tocar la estructura durante una falta a tierra.

2.3 Distribución de la corriente de falta

En el caso en el que se produce una falta de una sola fase del parque eólico, la corriente necesita ser redirigida a su fuente. La corriente pasa a través de la malla de tierra, la cual tiene una impedancia finita, elevando la tensión global con respecto a tierras remotas. Esto es conocido como la elevación del potencial de tierra. El recorrido de la corriente se muestra en Figura 4 para la falta de una fase.

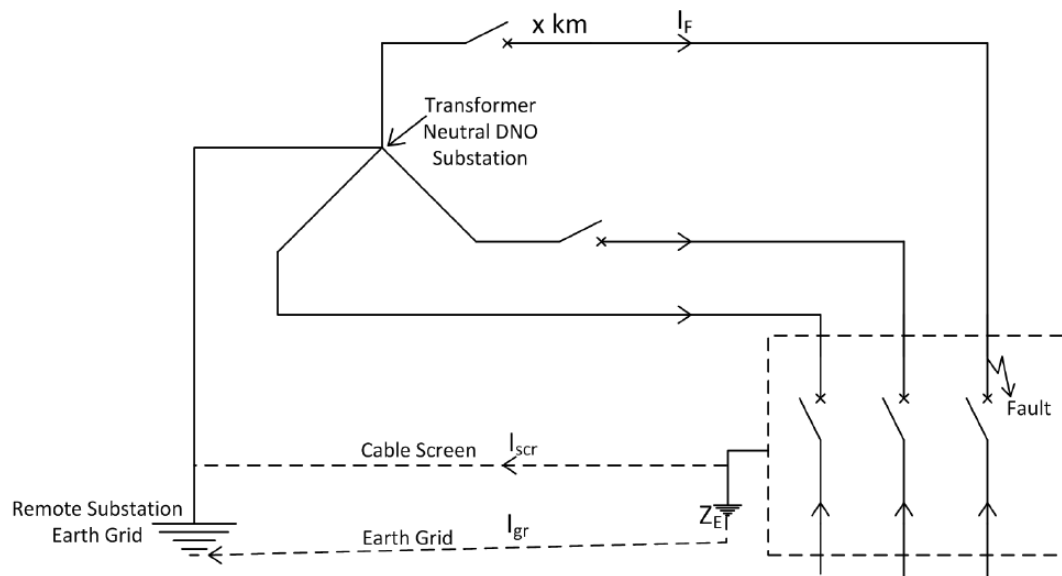


Figura 4: Distribución de la corriente de una falta monofásica del parque eólico

La figura mostrada es para el caso de una falta de una fase del parque. La evacuación de energía desde cada aerogenerador hasta la subestación del parque se hace mediante cables con un apantallamiento que hace que la resistencia global del sistema sea menor para que así la corriente tenga un camino más fácil para circular, además de disminuir la elevación del potencial de tierra. El apantallamiento de estos cables se conecta a la malla de tierra de cada aerogenerador. Si no se tuvieran cables apantallados $I_{gr} = I_F$.

De acuerdo con la norma que se esté trabajando, la elevación del potencial de tierra dirá a partir de qué tensión es aceptable el diseño o no. Además de la magnitud de la corriente de falta, esta tensión también depende de la duración de la propia falta, ya que cuanto más dure, menos tensión podrá soportar.

2.4 Tensiones significativas en los diseños de puesta a tierra

Esta sección evalúa las tensiones que se necesitan considerar con el fin de diseñar un sistema de puesta a tierra eficaz. Las principales tensiones que hay que remarcar en este apartado son la elevación del potencial de tierra (RoEP), la tensión de paso y la tensión de contacto. Estos cálculos de tensión son esenciales, ya que en última instancia ayudan a proteger la vida humana y los equipos del lugar. Mediante el cálculo de la tensión máxima que pueda surgir en el emplazamiento, los diseñadores de la puesta a tierra evaluarán las características de la capa superficial que se necesita con el fin de cumplir con los estándares aceptables, es decir, bajar la tensión de manera que no sea una amenaza para la vida humana.

2.4.1 Elevación del potencial de tierra (RoEP)

Tal y como se ha citado anteriormente, la norma IEC 61936-1 define la elevación del potencial de tierra (ROEP) como "la tensión entre el sistema de tierra y una tierra de referencia" [4], siendo la tierra de referencia "la parte de la tierra considerada como conductora y que tiene cero tensión que está fuera de la zona de influencia de la malla de tierra relevante" [4].

El producto de la corriente de defecto por la resistencia de malla se traduce en la máxima tensión que puede surgir en la malla de tierra diseñada. Con el fin de disminuir la elevación del potencial de tierra, el neutro transformador limita la corriente de defecto que se extiende por la malla de tierra.

La elevación del potencial de tierra se utiliza esencialmente para determinar si un sitio se considera que es peligroso o no. Hay varios factores que contribuyen a esta deliberación, tales como la resistencia de la malla que influye directamente en la máxima tensión que puede surgir en la rejilla de la tierra y las normas internacionales que tienen diferentes criterios de evaluación de la máxima elevación de potenciales de tierra permitida.

La elevación del potencial de tierra tiende a seguir una atenuación radial alrededor del aerogenerador o la subestación, es decir, cuanto más lejos se analice la elevación del potencial de tierra de los aerogeneradores o de la subestación, más pequeño será el valor del mismo [10].

2.4.2 Tensiones de paso y de contacto

Después de identificar la elevación del potencial de tierra, el diseño de puesta a tierra evalúa las tensiones de paso y contacto del sitio y determina su efecto sobre la vida humana y en los órganos vitales, en particular, los pulmones y el corazón [11]. Es por eso que la tensión de contacto en un tiempo de despeje concreto es siempre más peligrosa que la tensión de paso. Si alguien toca un objeto conductor durante una falta, la corriente viaja a través del corazón y los pulmones, a través de las piernas hasta el suelo y esto puede ser muy peligroso, incluso una

corriente muy pequeña a 50 Hz puede ser muy peligrosa. La tensión de paso, por otro lado, no va a través de estos órganos vitales. La corriente sube por una pierna, y a través de la ingle baja por la otra pierna hasta el suelo. Esto puede ser muy desagradable; sin embargo, no pone en peligro la vida humana tanto como la tensión de contacto.

Haciendo referencia a la norma IEC 61936-1, define las tensiones de paso y contacto como “la tensión entre dos puntos de la superficie de la tierra que están a 1 m de distancia” y “la tensión entre partes conductoras cuando se tocan simultáneamente” [4]. La norma IEEE std.80-2000 define la tensión de paso como “La diferencia de tensión de la superficie experimentada por una persona con una distancia entre los pies de 1 m en contacto con cualquier objeto de tierra” [12]. La tensión de contacto, por otro lado, es la diferencia de tensión entre la tensión de la superficie donde se encuentra la persona y la de la estructura de puesta a tierra con la que esa persona está en contacto [12].

La Figura 5 refleja la tensión de paso y la de contacto. Es evidente mencionar que cuando la persona está en contacto con la estructura y a una distancia corta es más vulnerable a la tensión de contacto que aun estando en contacto con la estructura pero a una distancia mayor. La tensión de paso es ligeramente menos peligrosa. Por ese motivo, la tensión de contacto requiere especial atención en el diseño del sistema de puesta a tierra.

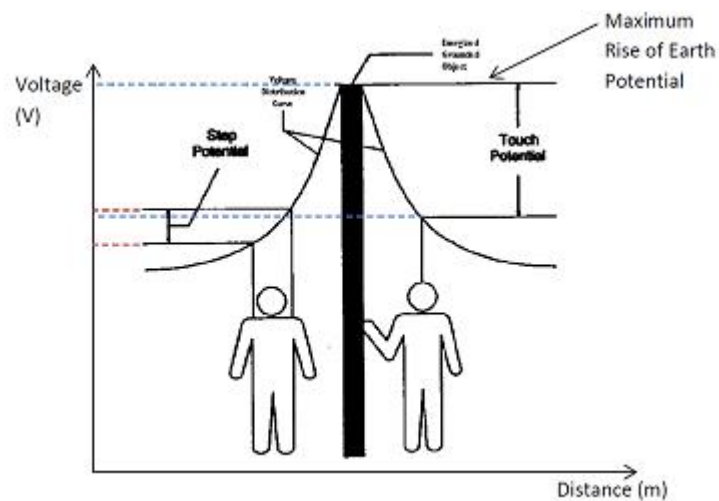


Figura 5: Tensiones de paso y de contacto

Para este proyecto se utilizará la norma IEC 61936-1 para evaluar las tensiones de paso y contacto admisibles.

2.5 Protección contra rayos

En el caso de las turbinas eólicas, no será preciso calcular el apantallamiento contra descargas directas de rayo, debido a que no es un alcance propio de este estudio. Sin embargo, el sistema de puesta a tierra sí debe proporcionar el camino necesario para la evacuación de dicha corriente de rayo (alta frecuencia). En este apartado es necesario mencionar la norma IEC 61400-24 la cual trata sobre la protección contra el rayo. En ella se definen entre otras cosas los requerimientos para la protección de descarga de rayos directa o indirectamente en las palas y otros componentes estructurales, así como para los sistemas eléctricos y electrónicos [13]. La norma IEC 61936-1 también tiene en cuenta este fenómeno, en la cual menciona que es necesario que todas las partes metálicas estén conectadas y derivadas a tierra para que ante una posible caída de rayo, este se evacúe lo más rápido posible a tierra y así evitar dañar a personas o equipos.

En un parque eólico, la protección contra rayos se considera para aerogeneradores en lugar de subestaciones, ya que el primero es un blanco metálico significativamente más grande y por lo tanto, es más propenso a ser alcanzado por un rayo. La caída de rayos pueden tener un efecto muy peligroso en las turbinas al poder dañar las palas y afectar a su rendimiento en última instancia, es decir, afecta a su capacidad de generación de electricidad [14]. Más específicamente, se pueden dañar equipos costosos, como el PDP (panel de distribución primaria) y la UCT (Unidad de Control de la Torre) y tener que reparar constantemente estos puede convertirse en una gran pérdida económica innecesaria por parte de la empresa responsable de la generación de energía del parque [15].

3. Comparación de los softwares disponibles

En este capítulo se hará una comparativa de los diferentes softwares disponibles para la realización de este proyecto.

3.1 ETAP

ETAP es un software muy conocido dentro del mundo de los sistemas eléctricos de potencia que tiene un amplio rango de posibilidades de actuación, como, transformadores, líneas de transmisión, arco eléctrico, armónicos, redes de tierra...

Es un programa informático muy utilizado para realizar los flujos de carga de líneas y obtener la corriente de cortocircuito de las mismas. Como puntos fuertes que tiene este software se pueden remarcar su sencillez, la alta fiabilidad de los resultados y su carácter intuitivo. Como debilidades, hay que destacar que tiene limitaciones en cuanto a número de sitios, es decir, no permite meter diferentes localizaciones con diferentes capas y resistividades, por lo que no es posible hacer el diseño de este proyecto, ya que se tienen varios aerogeneradores y la subestación. Además, es necesario el uso de una licencia para trabajar con el programa.

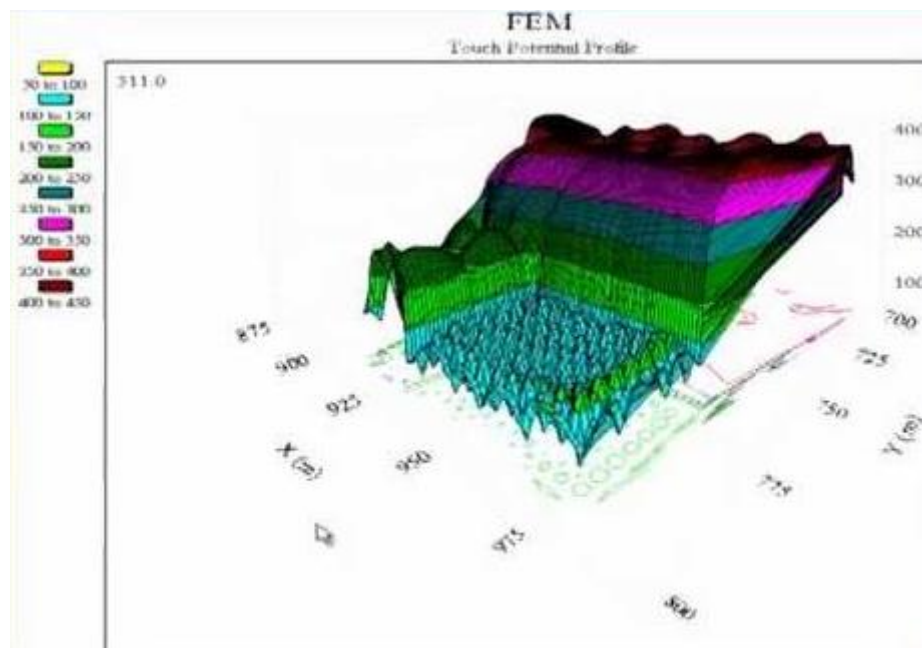


Figura 6: Simulación del software ETAP

Ante la falta de la licencia, se desconoce más información que podría ser útil para describir el manejo del software. También se ha intentado consultar el precio de la misma pero no ha habido respuesta por parte del fabricante.

3.2 WinIGS

WinIGS es el nombre que toma el programa “Integrated Grounding System Analysis for Windows”. Es un software muy completo el cual permite hacer un análisis muy exhaustivo de un sistema de tierras complejo. Respecto a los puntos a favor que tiene este programa, comentar que el interfaz con el usuario es sencillo e intuitivo y permite tener un modelo de suelo para cada puesta a tierra del sistema, esto es, permite tener un modelo de suelo para cada aerogenerador y para la subestación. Esto es una gran ventaja, ya que hay otros softwares que realizan el análisis con el modelo de suelo medio de todo el parque eólico. Tiene una amplia gama de catálogos de cables, conductores, tipos de torres de para el transporte de los cables...

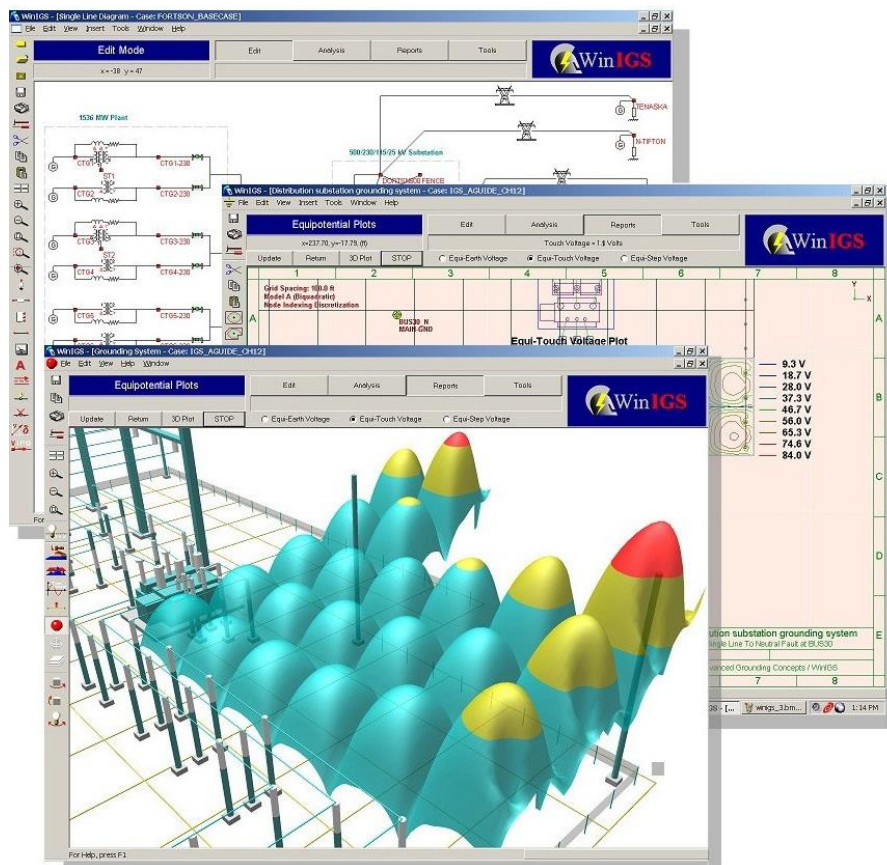


Figura 7: Interfaz del software WinIGS

Como aspectos negativos hay que destacar que para realizar tanto el diseño de la malla de tierra de cada aerogenerador, como la interconexión del parque, necesita muchos parámetros y características que se desconocen o solo se pueden obtener haciendo medidas in-situ. Además, es necesaria una licencia para poder ejecutar el programa y obtener resultados. Al igual que el software anterior, se ha intentado conseguir el precio de la licencia pero no ha habido respuesta por parte del fabricante.

El software tiene 4 bloques importantes que son: *Edit*, *Analysis*, *Report* y *Tools*. El primero de ellos es el encargado de hacer el diseño de la malla de tierra, así como de seleccionar los tipos de conductores y la inserción de las medidas de resistividad del suelo. El segundo, se encarga de ejecutar el diseño realizado para las condiciones deseadas, esto es, para la corriente de fallo y el tiempo de falta deseados. El bloque de *Reports*, muestra los resultados de la simulación y permite obtener imágenes representativas de cualquier aspecto que se quiera analizar. El último, el que hace referencia a *Tools*, es el que tiene todos los catálogos de los diferentes componentes necesarios para hacer correctamente la instalación de puesta a tierra.

3.3 CDEGS

CDEGS corresponde a las siglas de “Current Distribution, Electromagnetic Fields, Grounding and Soil Structure Analysis”.

Este software es el más utilizado profesionalmente para los estudios de las redes de tierra. Ofrece gran variedad de modelos de suelo y tiene una herramienta de diseño de la red fácil de utilizar. El interfaz con el usuario es claro y sencillo y su manejo es muy intuitivo y visual.

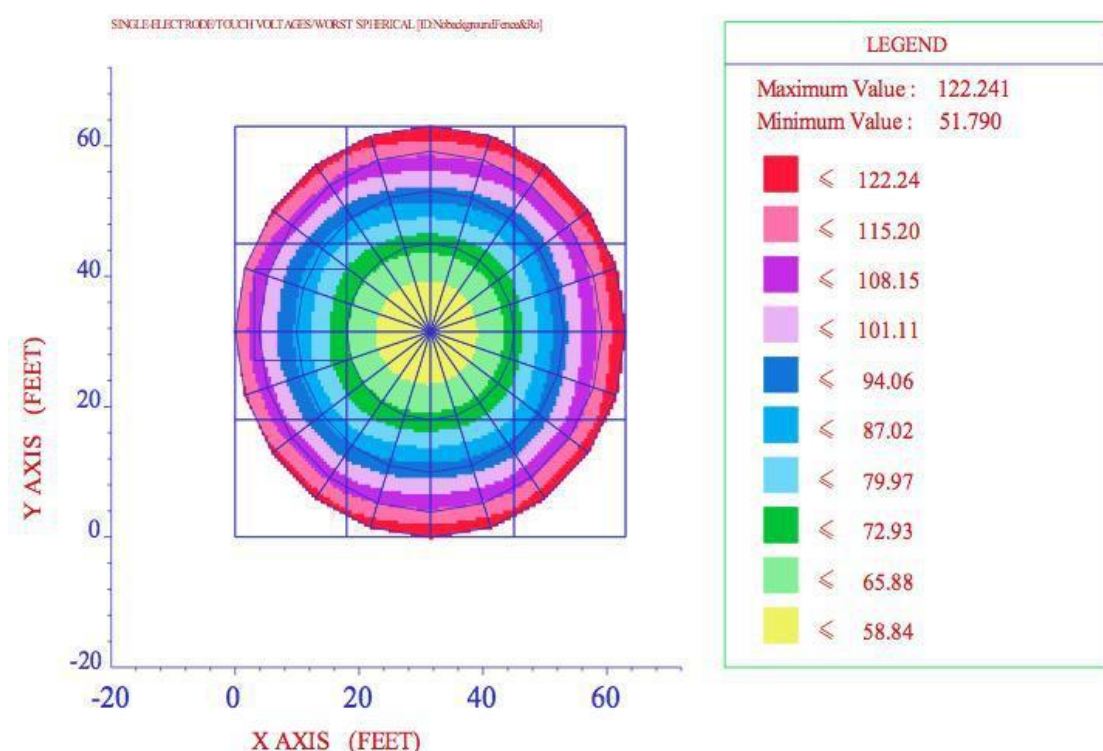


Figura 8: Simulación del software CDEGS

CDEGS es óptimo para estos diseños, ya que proporciona simulaciones exactas de los diferentes componentes, desde la evaluación de modelos de suelo hasta representaciones gráficas de las tensiones de contacto y de paso.

El análisis que hace de las características del suelo es para un modelo medio, es decir, toma toda la instalación como un modelo único. Ofrece un amplio abanico de tipos de conductores, cables, recubrimientos, etc. permitiendo al usuario editar el elemento deseado. Como punto en contra hay que recalcar que se requiere una licencia para ejecutarlo. En este caso, se dispone del precio, que va en función de las prestaciones que se quieran. El precio del programa completo rondarían los 84 000€, lo cual es un importe elevado. Hay packs que se pueden conseguir a partir de los 10 400€.

Al iniciar este programa, en la ventana principal aparecen varios módulos, que cada uno de ellos sirve para una cosa distinta. El encargado de la introducción de los datos de medidas de resistividad del suelo y de determinar el modelo del mismo es el módulo RESAP. También, hay un módulo que realiza el análisis de baja frecuencia de un sistema de puesta a tierra. En él se diseña la red de tierra que se desee a través de un interfaz de diseño gráfico. Este mismo módulo toma como dato de entrada el modelo de suelo que ha obtenido RESAP, esto es, se relacionan entre ellos.

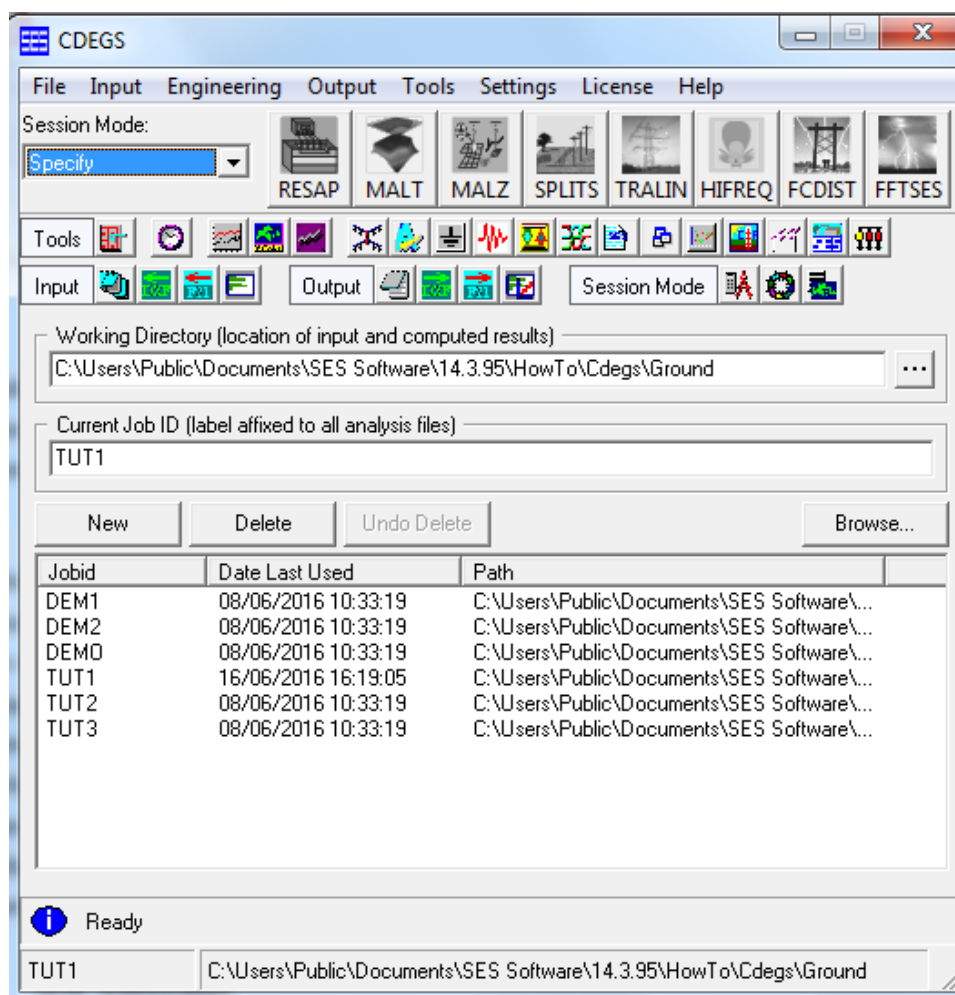


Figura 9: Pantalla principal del software CDEGS

MALZ es un módulo igual que el anterior pero para el análisis de alta frecuencia, siendo el mismo funcionamiento que MALT. El módulo encargado de analizar las corrientes de falta y las EMI es SPLITS. Posee de otro módulo que analiza los campos electromagnéticos, llamado HIFREQ.

3.4 Elección

Después de presentar los softwares disponibles y aptos para este proyecto, se debe elegir uno de ellos para hacer el análisis de la red de tierras de un parque eólico. Por lo tanto, vistas las características y los puntos fuertes y débiles de cada uno, se ha elegido hacerlo con el software CDEGS.

WinIGS también es un buen software para realizar el análisis pero la falta de datos tan precisos hace que sea imposible realizarlo. Además, para un estudio de validación de la malla de tierra, con tomar un modelo de suelo medio es suficiente. El software ETAP se ha descartado debido a que no es posible realizar diseñar el parque eólico por la limitación anteriormente comentada.

4. Estudio de los Parques Eólicos de Calango 6, Santana I y Santana II

Tal y como se ha mencionado anteriormente en la descripción del proyecto, este caso se centrará únicamente en los parques eólicos citados, es decir, Calango 6, Santana I y Santana II. Dichos parques se encuentran situados en Rio Grande Do Norte, al noreste de Brasil. Ambos parques confluyen en la Subestación eléctrica de Lago Nova.

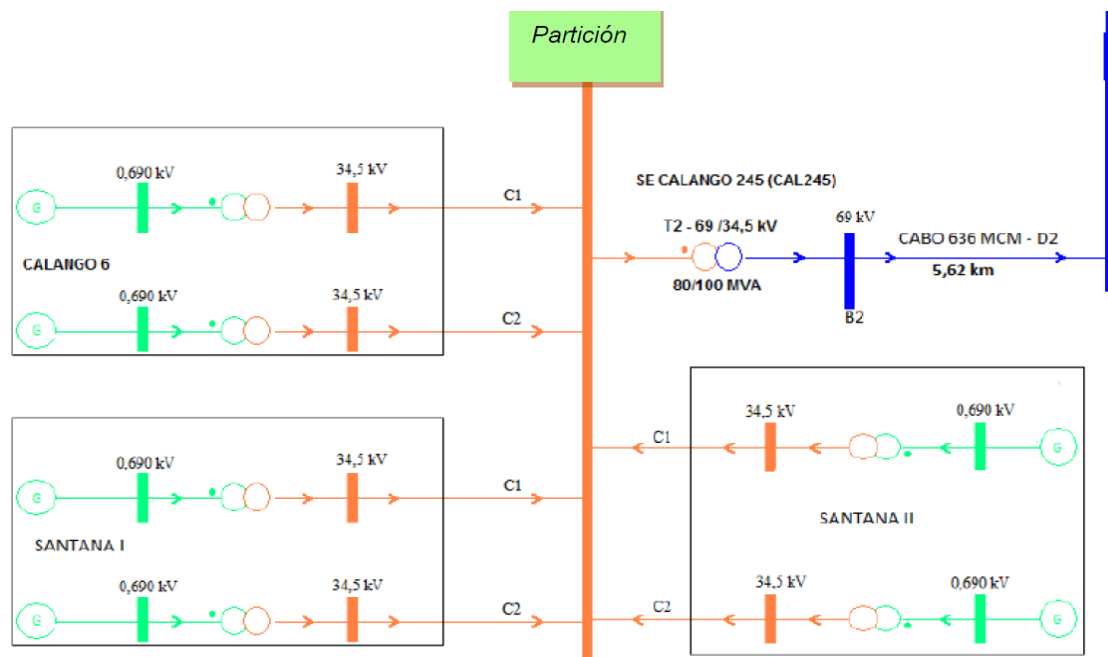


Figura 10: Ampliación del diagrama unifilar simplificado de los parques eólicos Calango 6, Santana I y Santana II. Partición en barras de 34.5 kV operando normalmente abierto

El parque eólico de Calango 6 se compone de 15 turbinas de 2MW cada una, al igual que el parque eólico de Santana I. por otro lado, el parque eólico de Santana II cuenta con un conjunto de 12 turbinas de 2 MW cada una. Por lo tanto, los tres parques suman una potencia instalada de 84 MW.

El emplazamiento tiene unos valores de resistividades del suelo muy elevados, ya que se trata de granitoides ricos en cuarzo. El tener valores muy altos de resistividad hace que la corriente de falta no tenga una vía fácil para derivarse a tierra, por lo que el diseño de la malla de tierra será de suma importancia.

El diseño de puesta a tierra se lleva a cabo utilizando el software de SES, CDEGS (Current Distribution, Electromagnetic Fields, Grounding and Soil Structure Analysis).

El proceso de diseño sigue el procedimiento mostrado en el diagrama de flujo en la Figura 1. A partir del análisis de las mediciones de suelo obtenidas en el sitio y después de encontrar el modelo del suelo en general, el diseño pasa luego a la determinación de la elevación del potencial de tierra y la tensión de paso y de contacto. El diseño del sistema de puesta a tierra del emplazamiento dependerá de si estas tensiones cumplen con las normas establecidas.

4.1 Modelo de suelo y datos de resistividad de los parques eólicos

La primera etapa en cualquier diseño de puesta a tierra comprende en la evaluación de las medidas del suelo recogidas en el lugar y utilizarlas para determinar modelo de múltiples capas del suelo del parque eólico. Mediante la inserción de las medidas del suelo con el método Wenner que se determinaron en el sitio en CDEGS, se obtienen las gráficas del modelo del suelo de cada aerogenerador y el global del parque. Como se comentó anteriormente, el método Wenner calcula la resistencia aparente dividiendo el análisis de la sonda de corriente con las mediciones de sonda de tensión. Las mediciones in situ fueron proporcionadas por la empresa contratante y se pueden ver en el Anexo A.

Los datos se insertan en el módulo RESAP que es un módulo dentro del programa CDEGS responsable de interpretar las lecturas de la matriz Wenner y que ilustra estos en una gráfica el espesor de la capa del suelo (también conocida como la profundidad 'a') frente a la resistividad de la capa. Las gráficas se han hecho para todos los aerogeneradores, es decir, para un total de 42 lecturas individuales. Por lo tanto, para cada capa se calcula el espesor medio y la resistividad para un modelo de suelo promedio del sitio.

Esta sección es absolutamente crítica para determinar la resistividad promedio del suelo, que en última instancia determinará la impedancia total del diseño de la tierra y el consiguiente aumento del potencial de tierra (RoEP). Después de introducir las mediciones de suelo (Anexo A), en CDEGS, las gráficas de resistividad se reproducen y se muestra un ejemplo de un aerogenerador en la Figura 11. Todas las demás gráficas se pueden ver en el Anexo B.

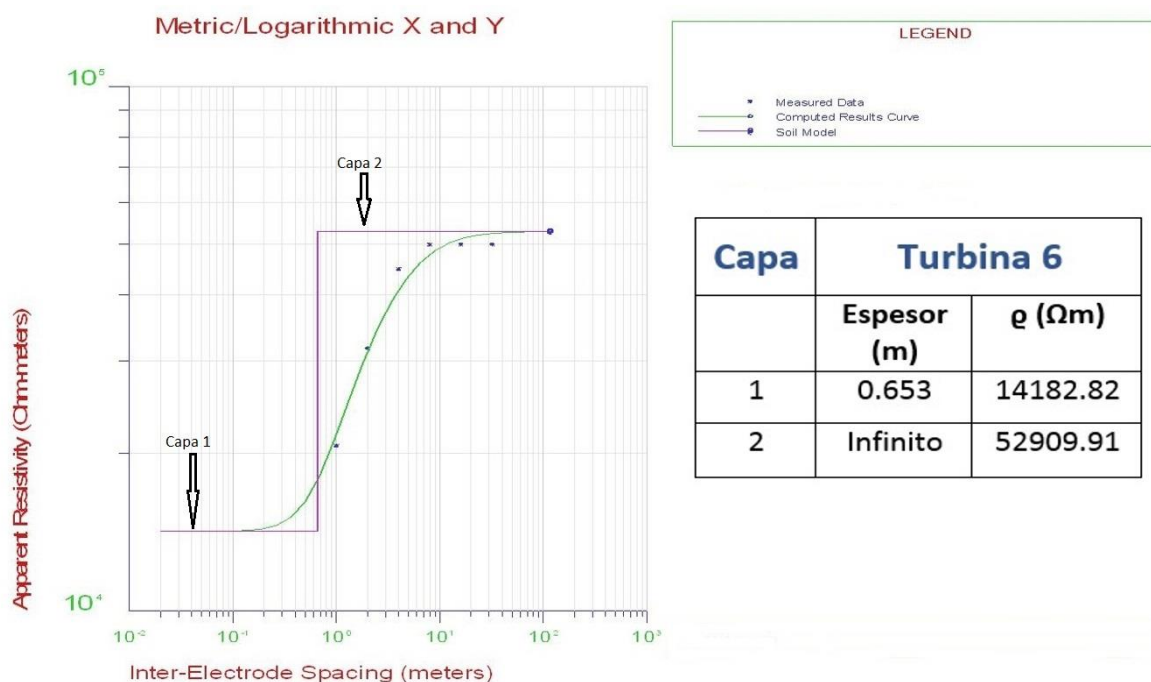


Figura 11: Modelo del suelo del aerogenerador 6 del parque eólico Calango 6

Tal y como se puede observar en la imagen superior, se aprecian dos capas horizontales con diferentes valores de resistividad. Como se puede comprobar en el Anexo B, hay medidas que hacen que el modelo de suelo tenga tres capas horizontales de resistividad bien diferenciadas. En este caso, es evidente que hay dos capas debido a que hay un punto de inflexión representado con la línea verde. Cabe destacar que la primera capa tiene menos resistividad que la segunda, por lo que para el diseño de la puesta a tierra hay que tenerlo en cuenta. Los valores de resistividad que se tienen en este entorno son elevados, eso quiere decir que será más complicado derivar la corriente a tierra.

A continuación, se muestra una tabla en la que están recogidos los resultados del análisis gráfico hecho sobre todos los aerogeneradores, estaciones meteorológicas, parques y el conjunto al completo, es decir, de los tres parques unidos. Se muestran los resultados de la resistividad y la profundidad de las capas.

CALANGO 6								
Capa	Turbina 1		Turbina 2		Turbina 3		Turbina 4	
	Espesor (m)	ρ (Ωm)	Espesor (m)	ρ (Ωm)	Espesor (m)	ρ (Ωm)	Espesor (m)	ρ (Ωm)
1	0,627	7 500	0,527	582	0,0654	150	0,785	1 812,5
2	Infinito	55 151,92	Infinito	60 300	Infinito	125808,5	Infinito	39 064,19

Capa	Turbina 5		Turbina 6		Turbina 7		Turbina 8	
	Espesor (m)	ρ (Ωm)	Espesor (m)	ρ (Ωm)	Espesor (m)	ρ (Ωm)	Espesor (m)	ρ (Ωm)
1	0,553	303,12	0,653	14 182,82	0,448	1 212,5	1,274	2 580,44
2	3.042	17 426,84	Infinito	52 909,91	Infinito	37 673,96	Infinito	70 379,14
3	Infinito	89,68						
Capa	Turbina 9		Turbina 10		Turbina 11		Turbina 12	
	Espesor (m)	ρ (Ωm)	Espesor (m)	ρ (Ωm)	Espesor (m)	ρ (Ωm)	Espesor (m)	ρ (Ωm)
1	0,934	11 582,86	1,243	23 578	0,811	1 982, 09	0,486	1 692,84
2	Infinito	52 643,98	Infinito	52 538,8	Infinito	15760	1.83	34 111,54
3							Infinito	3 847,27
Capa	Turbina 13		Turbina 14		Turbina 15		Estación metereológica	
	Espesor (m)	ρ (Ωm)	Espesor (m)	ρ (Ωm)	Espesor (m)	ρ (Ωm)	Espesor (m)	ρ (Ωm)
1	0,493	803,47	1,301	3 879,344	0,711	3 050	2,101	16 485,04
2	2,014	20 636,2	Infinito	37 918,86	Infinito	43 013,72	Infinito	4 4847
3	Infinito	586,148						
SANTANA I								
Capa	Turbina 1		Turbina 2		Turbina 3		Turbina 4	
	Espesor (m)	ρ (Ωm)	Espesor (m)	ρ (Ωm)	Espesor (m)	ρ (Ωm)	Espesor (m)	ρ (Ωm)
1	0,67	8 325,99	0,351	7 322	5,656	18 804	1.074	10 778,98
2	Infinito	44 300,74	Infinito	16 616,7	6,139	5 538,793	Infinito	51 407,03
3					Infinito	279 165,6		
Capa	Turbina 5		Turbina 6		Turbina 7		Turbina 8	
	Espesor (m)	ρ (Ωm)	Espesor (m)	ρ (Ωm)	Espesor (m)	ρ (Ωm)	Espesor (m)	ρ (Ωm)
1	1,759	25 842,79	1.746	18 605,32	0,123	3 987,5	0,948	48 727,83
2	Infinito	51 951,29	Infinito	52 908,05	9,344	19 981,67	2,816	35 606,68
3					Infinito	105 801,6	Infinito	52 186,77
Capa	Turbina 9		Turbina 10		Turbina 11		Turbina 12	
	Espesor (m)	ρ (Ωm)	Espesor (m)	ρ (Ωm)	Espesor (m)	ρ (Ωm)	Espesor (m)	ρ (Ωm)

1	0,394	28 050	0,803	25 937,5	0,958	16 975	1,911	20 669,32
2	3,901	39 825,54	Infinito	48 710,41	Infinito	51 142,91	Infinito	49 222,82
3	Infinito	51 612,53						
Capa	Turbina 13		Turbina 14		Turbina 15		Estación metereológica	
	Espesor (m)	ρ (Ωm)	Espesor (m)	ρ (Ωm)	Espesor (m)	ρ (Ωm)	Espesor (m)	ρ (Ωm)
1	1,705	14 981,79	1,124	10 828	2,1153	12 102,95	0,9	14 263
2	Infinito	50 623,68	1,507	38 566,29	Infinito	36 365,65	Infinito	46 327,59
3			Infinito	33 045,5				
SANTANA II								
Capa	Turbina 1		Turbina 2		Turbina 3		Turbina 4	
	Espesor (m)	ρ (Ωm)	Espesor (m)	ρ (Ωm)	Espesor (m)	ρ (Ωm)	Espesor (m)	ρ (Ωm)
1	0,492	4 528	0,588	10 945,68	0,905	13 951,93	7,506	15 419,34
2	Infinito	53 130,99	1,324	102 479	10,074	17 590,17	2,511	1 413,54
3			Infinito	37 688,88	Infinito	137 172,2	Infinito	51 830,11
Capa	Turbina 5		Turbina 6		Turbina 7		Turbina 8	
	Espesor (m)	ρ (Ωm)	Espesor (m)	ρ (Ωm)	Espesor (m)	ρ (Ωm)	Espesor (m)	ρ (Ωm)
1	1,9269	11 619,81	1,359	8 812,5	1,359	8 812,5	0,966	2 437,5
2	Infinito	55 774,67	8,956	37 917,8	8,956	37 917,8	4,128	82 676,75
3			Infinito	817,2	Infinito	817,2	Infinito	338,21
Capa	Turbina 9		Turbina 10		Turbina 11		Turbina 12	
	Espesor (m)	ρ (Ωm)	Espesor (m)	ρ (Ωm)	Espesor (m)	ρ (Ωm)	Espesor (m)	ρ (Ωm)
1	3,318	8 952,82	2,163	5 862,67	2,561	6 828,82	0,634	2 012,5
2	Infinito	65 120,43	Infinito	8 617,64	5,723	45 240,69	1,827	32 123,81
3					Infinito	735,90	Infinito	3 295,85
Capa	Estación metereológica							
	Espesor (m)	ρ (Ωm)						
1	0,353	3 137,5						
2	Infinito	5 822,091						
PARQUES								

Capa	CALANGO 6		SANATANA I		SANATANA II		CONJUNTO DE PARQUES	
	Espesor (m)	ρ (Ω m)	Espesor (m)	ρ (Ω m)	Espesor (m)	ρ (Ω m)	Espesor (m)	ρ (Ω m)
1	0,873	4 953,84	1,032	16 649	0,825	7 141,8	1,204	10 863,15
2	Infinito	35 920,48	Infinito	42 395,93	Infinito	29 253,03	Infinito	36 204,56

Tabla 2: Valores de resistividad y profundidad de las capas de los aerogeneradores, estaciones meteorológicas, parques y conjunto de parques utilizando CDEGS

Después de analizar estos resultados mostrados en la Tabla 2, hay que comentar que no existe un patrón determinado del modelo de suelo del emplazamiento. Hay zonas en las que prevalecen dos capas, mientras que en otras son tres. Hay casos en los que el programa muestra resultados con un valor de resistividad muy elevados y esto es debido a que no son suficientes datos como para formar un buen modelo y por tanto, debe extrapolar y determinar dónde puede ser la siguiente capa.

Los datos de la estación meteorológica no son más que para tener más precisión en el modelo del suelo, ya que a la hora de hacer el sistema de puesta a tierra de los tres parques, las estaciones no se tienen en cuenta, dado que no habrá ninguna falta en las mismas.

4.2 Diseño de la malla de tierra

Esta sección detalla la disposición de conductor de cobre en el lugar junto con las pantallas de los cables, además del tipo de conductor de cobre y de su profundidad de enterramiento utilizado en el diseño. Como se ha mencionado, el diseño de la malla de tierra de los aerogeneradores por sí misma es un proceso iterativo mediante el cual puede necesitar ser modificada dependiendo de los resultados generados en una etapa posterior del diseño.

4.2.1 Puesta a tierra de los aerogeneradores

La puesta a tierra de los aerogeneradores se simulará de acuerdo a los siguientes requerimientos facilitados por la empresa promotora del parque eólico:

- Anillo exterior a la torre un metro por fuera y enterrado 0,5 metros.
- Anillo perimetral exterior a un metro por fuera del fin de la cimentación y enterrado 1 metro.
- Secciones recomendadas de 70 mm².
- 4 picas de 2,5 metros de longitud separadas 90° entre sí y de \varnothing 20mm.

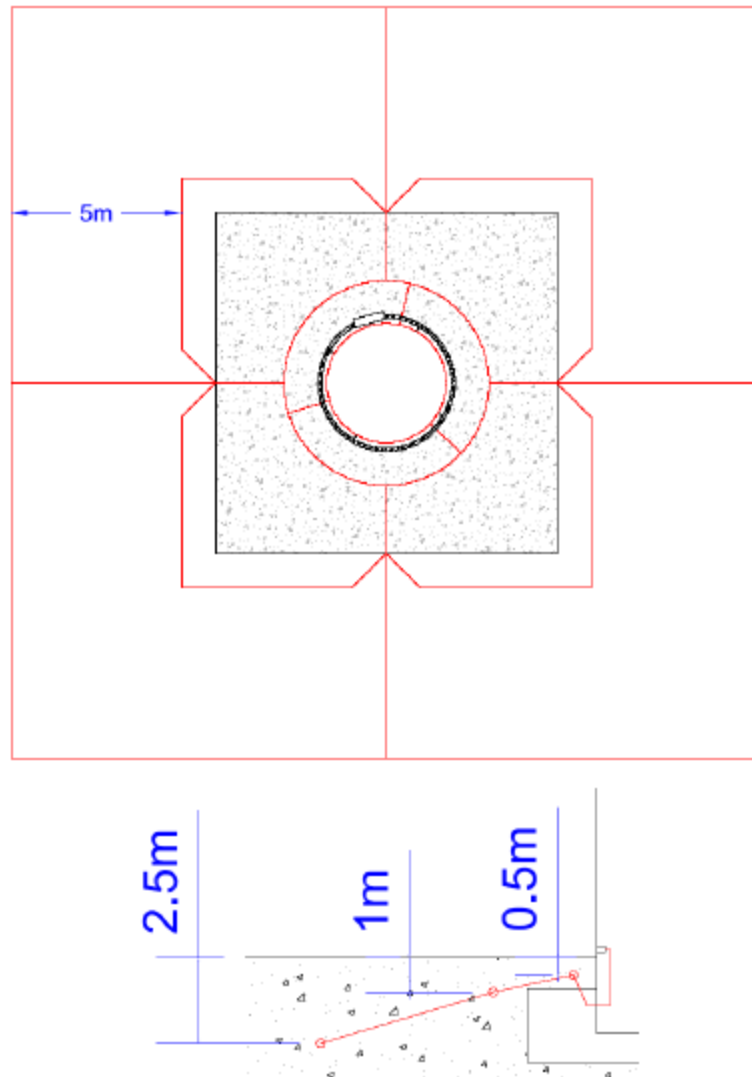


Figura 12: Sistema de puesta a tierra de los aerogeneradores

En la Figura 12 se muestra el sistema de puesta a tierra para el caso de cimentaciones cuadradas, pero para el caso de las cimentaciones circulares el método es el mismo. Se puede apreciar un anillo perimetral adicional, aconsejado para condiciones de puesta a tierra difíciles, es decir, para zonas en la que la resistividad del terreno es muy elevada.

Además de estos anillos perimetrales, los aerogeneradores tienen en su base una acera perimetral de 2 metros y de 30 cm de espesor, que la ferralla de esta irá conectada a la malla de tierra. Para crear una superficie equipotencial que asegure la seguridad de las personas y disminuir las tensiones de paso y de contacto, la ferralla de la cimentación del aerogenerador también se conecta a la malla de tierra. En la siguiente imagen se muestra el modelo del aerogenerador desarrollado para las simulaciones con el CDEGS.

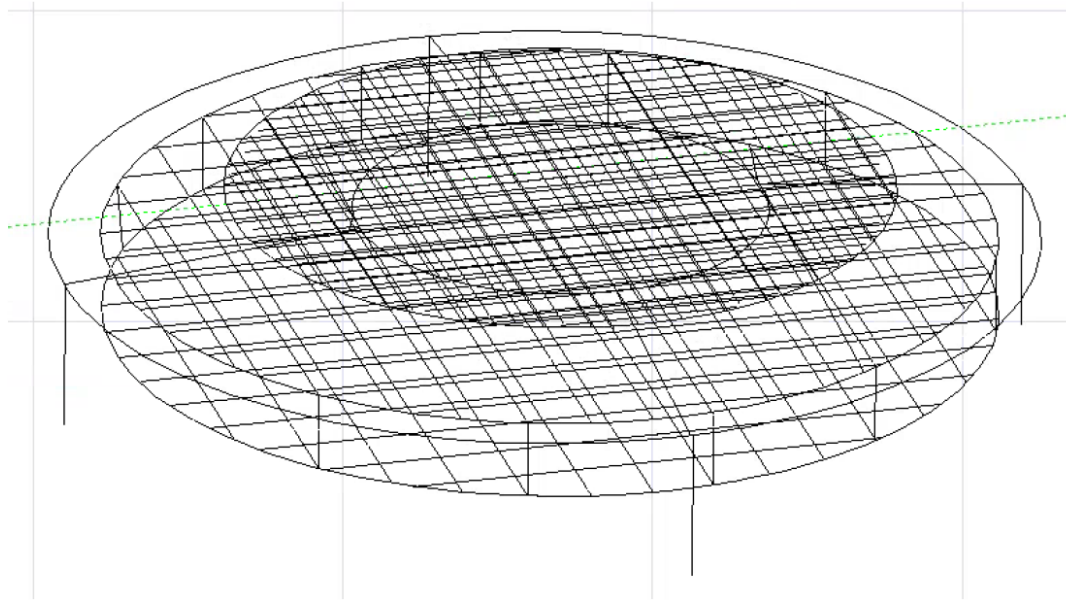


Figura 13: Modelo de la turbina para las simulaciones

4.2.2 Puesta a tierra de las subestación

La malla de la subestación se hará con cobre enterrado y con las siguientes características:

- Profundidad a la que está enterrada la malla (h): 0,6 m
- Espesor capa superficial: 0,1 m
- Resistividad capa superficial (ρ_s): $3000 \Omega \cdot m$
- Cable de tierra del conductor Cu: 95 mm^2

CABLE COBRE:

- Coef. térmico resistividad (20°C) : $\alpha_r = 0,00393 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
- Coeficiente ($1/\alpha_0$ a 0°C) : $K_0 = 234 \text{ }^\circ\text{C}$
- Resistividad 20°C : $\rho_r = 1,72 \mu\Omega \cdot \text{cm}$
- Factor Capacidad Térmica: $\text{TCAP} = 3,42 \text{ J/cm}^3/^\circ\text{C}$
- Temperatura máxima admisible: $T_m = 300^\circ\text{C}$
- Longitud del lado mayor de la malla (L_x): 64,5 m
- Longitud del lado menor de la malla (L_y): 52 m

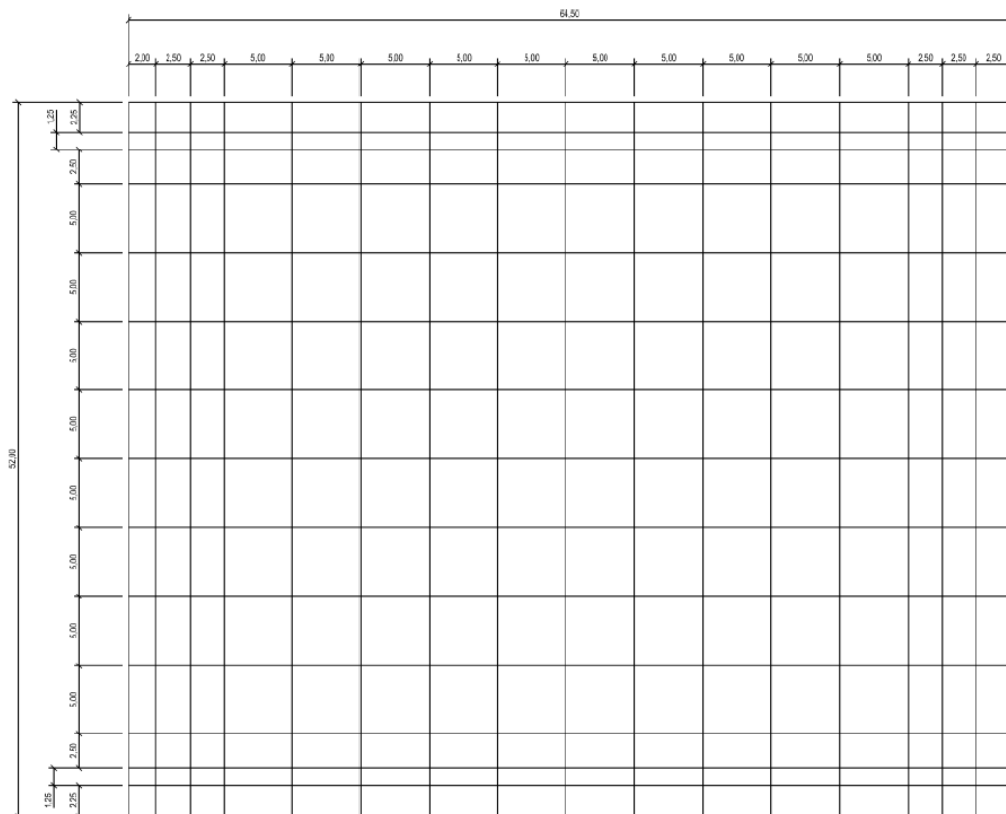


Figura 14: Sistema de puesta a tierra de la subestación

Hay que destacar que la malla de tierra de la subestación se extiende 1 m por fuera del perímetro de la edificación. Esto se hace para que no haya una tensión alta que haga que la tensión de contacto sea peligrosa para las personas que estén en las inmediaciones.

4.2.3 Interconexión de los parques y los aerogeneradores

La interconexión de la puesta a tierra de los aerogeneradores y la subestación se hará a través de un cable de cobre desnudo de 70 mm^2 . La siguiente imagen muestra la malla de tierra de los parques eólicos junto con la subestación.

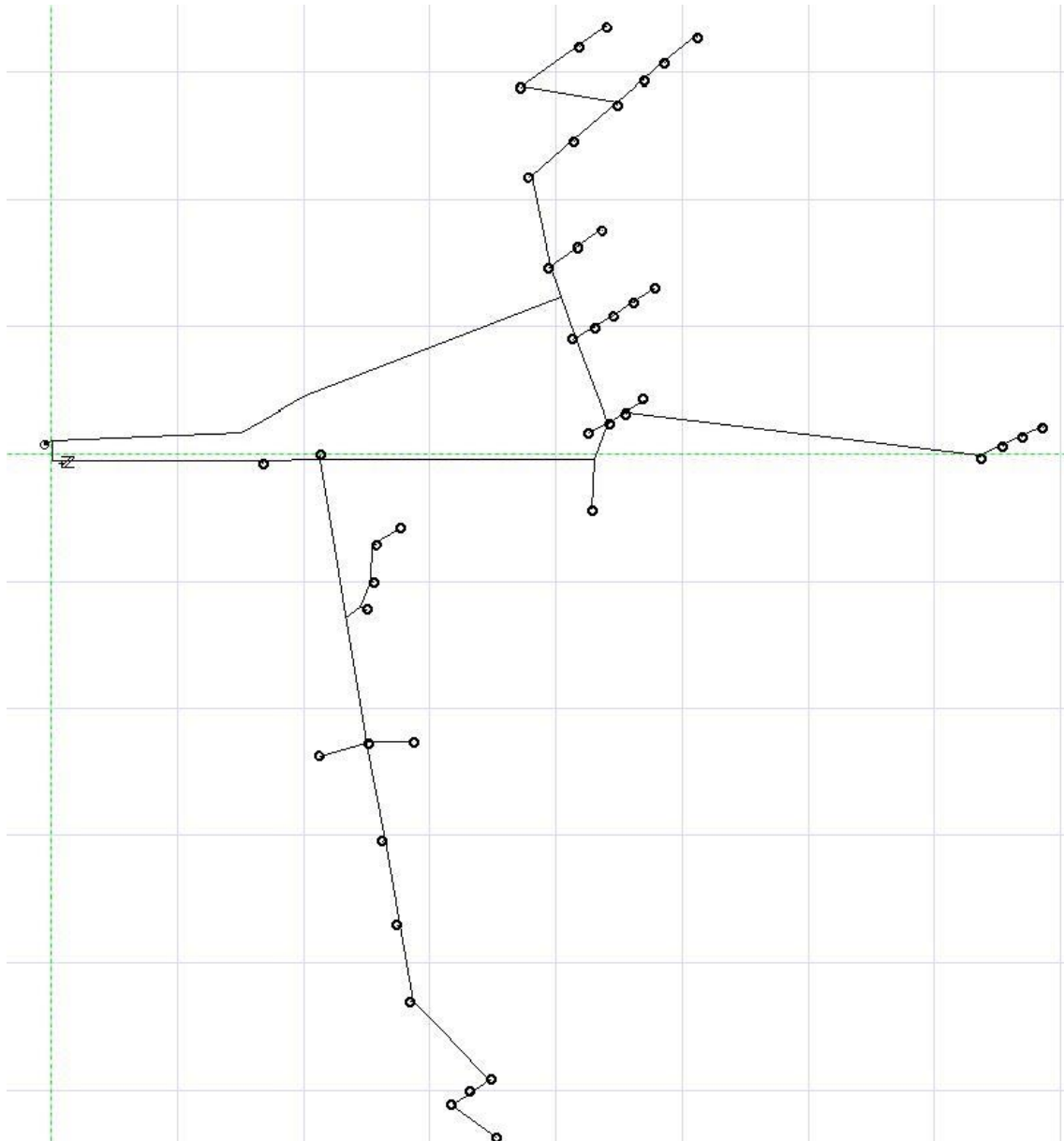


Figura 15: Modelo global de puesta a tierra de los parques eólicos

4.3 Análisis de la corriente de falta

La identificación de la tensión máxima que puede surgir en un parque eólico durante una falta de fase a tierra, es decir, la elevación del potencial de tierra (RoEP) es esencial para proteger tanto la vida humana en el entorno y los equipos en el lugar. Con el fin de obtener este valor, la impedancia total de la puesta a tierra de diseño tiene que ser encontrada junto con la máxima corriente de falta monofásica. La corriente monofásica es la peligrosa, no la corriente trifásica, debido a que la falta trifásica se anula y por lo tanto no fluye corriente resultante por la red de tierra. La corriente monofásica, por el contrario, tiene su única vía de retorno mediante el neutro del transformador DNO a través de la malla de la tierra como se muestra en la Figura 4. La corriente máxima de cortocircuito monofásico en 34,5 kV para defectos ubicados en los

aerogeneradores es de 0,5 kA. Este valor es limitado por una resistencia de puesta a tierra en el neutro del transformador. Por otra parte, la corriente máxima de cortocircuito monofásico en 34,5 kV para defectos ubicados en la SE Calango 245 es de 500 amperios. La corriente máxima de cortocircuito monofásico en 69 kV para defectos ubicados en la SE Calango 245 es de 10,02 kA. Por tanto, la corriente máxima de defecto considerada en subestación es de 10,02 kA.

Además, el máximo tiempo de despeje de falta para eventos ocurridos en la subestación es de 0,5 segundos. El máximo tiempo de despeje de falta para eventos ocurridos en los aerogeneradores es considerado de 1 segundo.

4.4 Determinación de la elevación del potencial de tierra

La elevación del potencial de tierra (RoEP) define la tensión máxima que puede surgir en el lugar. A través de la misma se estipula si el sitio en consideración es peligroso o no para la seguridad humana o para los equipos. Sin embargo, antes de determinar esta tensión, se deben conocer los límites de seguridad. En otras palabras, lo que se tiene que establecer previamente son los límites máximos de tensión, ya sea el aumento máximo del potencial de tierra o de los potenciales de paso y contacto. Para que el diseño de puesta a tierra sea eficaz, tiene que cumplir con la norma anteriormente mencionada, es decir, la IEC 61936-1.

En la siguiente imagen se puede apreciar el criterio utilizado para la tensión de contacto extraído de la norma IEC 61936-1. La tensión de paso, por otro lado, tal y como se ha comentado, no es tan peligrosa como la tensión de contacto, de tal manera que el límite de seguridad está por encima que el de la tensión de contacto.

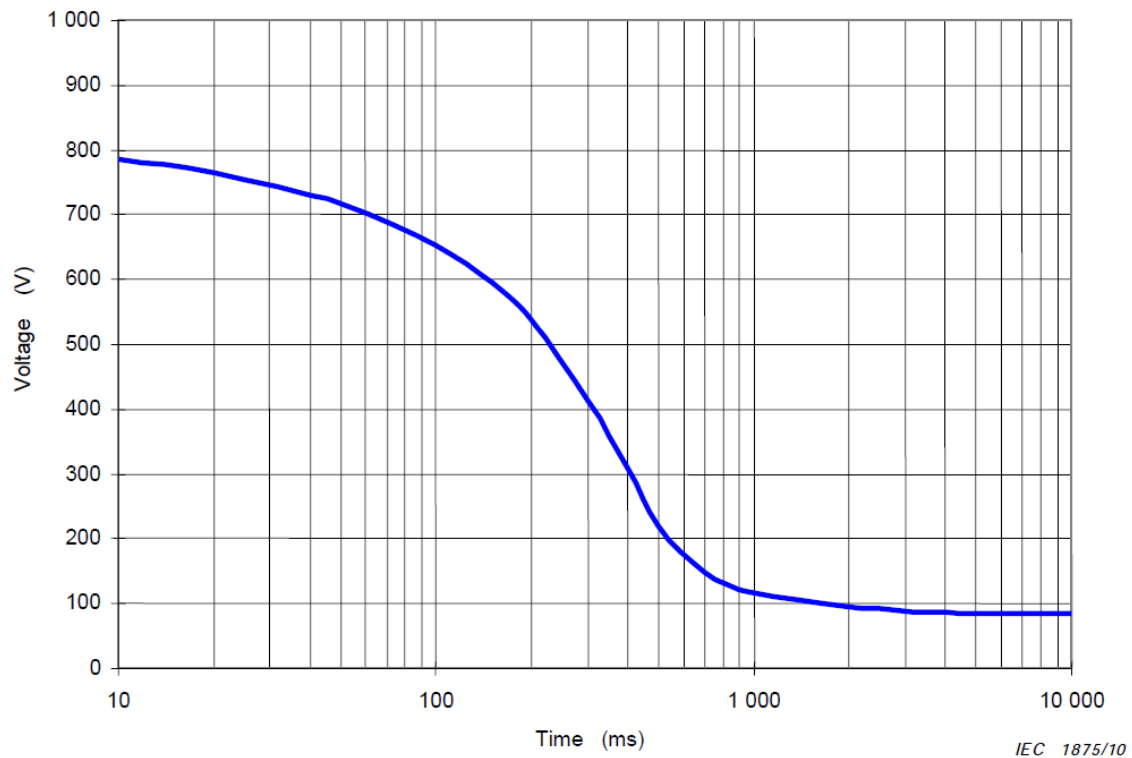


Figura 16: Tensión de paso permitida

Este valor de tensión equivale a un suelo sin gravilla, pero tanto en la subestación eléctrica como en la base de los aerogeneradores, existe una capa de grava para que aumente la resistividad superficial y así aumentar los valores límite de la tensión de paso y de contacto.

El análisis de la elevación del potencial de tierra (RoEP) se ha realizado con el módulo MALZ del software CDEGS. Este módulo es el responsable del diseño de la malla de tierra, en el cual se establece la corriente de falta y el modelo de suelo previamente analizado.

Al modelar el diseño de malla de la tierra en el modelo de suelo multicapa adecuado, el software determina la impedancia a tierra global del parque eólico. Posteriormente, el módulo MALZ utiliza esta impedancia y lo multiplica con la máxima corriente de falta con el fin de determinar la elevación del potencial de tierra. El parque eólico debe ser dibujado con precisión sobre el programa, es decir, tiene que ser dibujado a escala y esto da una representación gráfica del lugar donde se encuentran potenciales zonas peligrosas. Esta es también conocida como *copper arrangements* y es esencial para marcar las pistas conductoras y las pantallas de los cables ya que estos son en última instancia los principales portadores de corriente y actuar como una alfombra de puesta a tierra eficaz de la corriente de defecto. El resultado de la simulación del programa se puede ver a continuación.

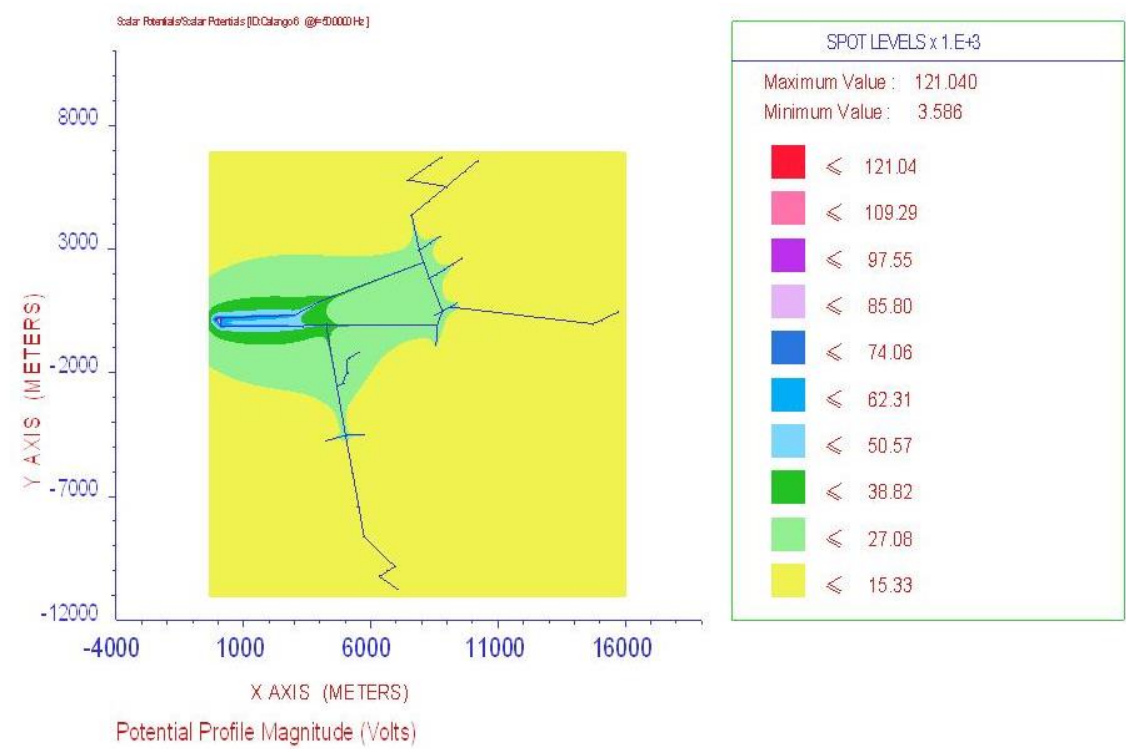


Figura 17: Simulación en CDEGS de la elevación del potencial de tierra de los parques eólicos

Report #2:

DATE OF RUN (Start)= DAY 8 / Month 6 / Year 2016
 STARTING TIME= 18:25:59:58

===== < M A L Z (SYSTEM INFORMATION SUMMARY) > =====

Run ID.....: Calango 6
 System of Units: Metric
 Earth Potential/Magnetic Field Calculations : Potentials
 Number of Energization Source Busses: 1
 Current Injected in Reference Source Bus....: 10020 Amps
 Energization Scaling Factor (SPLITS/FCDIST/specified)...: 1.0000
 Number of Original Conductors: 4299
 Number of Frequency Values to be Analyzed...: 1
 Power Source Frequency.....: 50.000 Hertz
 Impedance Values are Based On.....: 50.000 Hertz
 Total Length of Conductor Network.....: 65271. meters

1

CHARACTERISTICS OF MEDIA SURROUNDING NETWORK

=====

AIR LAYER : Resistivity.....: 0.100000E+13 ohm-meters
 Relative Permittivity...: 1.00000
 Relative Permeability...: 1.00000

>>> SOIL TYPE : Multi-Layer Horizontal

LAYER No.	RESISTIVITY (ohm-meter)	RELATIVE Permittivity	RELATIVE Permeability	THICKNESS (meters)
1	10863.2	1.00000	1.00000	1.20462
2	36204.6	1.00000	1.00000	Infinite

1

Case Number.....: 1
 Frequency for This Case.....: 50.000 Hertz
 GPR of Reference Source Bus (# 1)....Magn...: 121899.6 Volts
 Angle...: 7.431784 degrees
 Impedance of Grounding System.....Magn...: 12.16563 Ohms
 Angle...: 7.431784 degrees

End of Report #2

Figura 18: Informe de la simulación en CDEGS de la elevación del potencial de tierra de los parques eólicos

Tal y como se puede observar en la Figura 18, la impedancia global de tierra es de **12,16L7,43° Ω** según el cálculo del CDEGS. Como consecuencia de ello, multiplicando esta impedancia por la corriente de falta, 10 020 A, la elevación del potencial de tierra es de 121 899,6 V. Es un valor de tensión muy alto, ya que la resistividad del terreno también lo es y en consecuencia, la impedancia global de tierra. Cabe destacar que la elevación del potencial de tierra va disminuyendo a medida que aumenta la distancia al punto donde se produce la falta.

4.5 Evaluación de la tensión de paso y de contacto

Las tensiones de paso y de contacto se han analizado en cada aerogenerador y en la subestación eléctrica. Los valores de estas no pueden sobrepasar el de la elevación del potencial de tierra, es decir, no pueden sobrepasar el valor de 121 899,6 V. La elevación del potencial de tierra representa la tensión máxima que puede surgir en el lugar, mientras que la tensión de contacto es la diferencia de tensión entre la estructura de la torre, por ejemplo, y la superficie del suelo a 1 m de la estructura. Esta es la razón por la que la tensión de paso y de contacto siempre serán menores que el límite establecido.

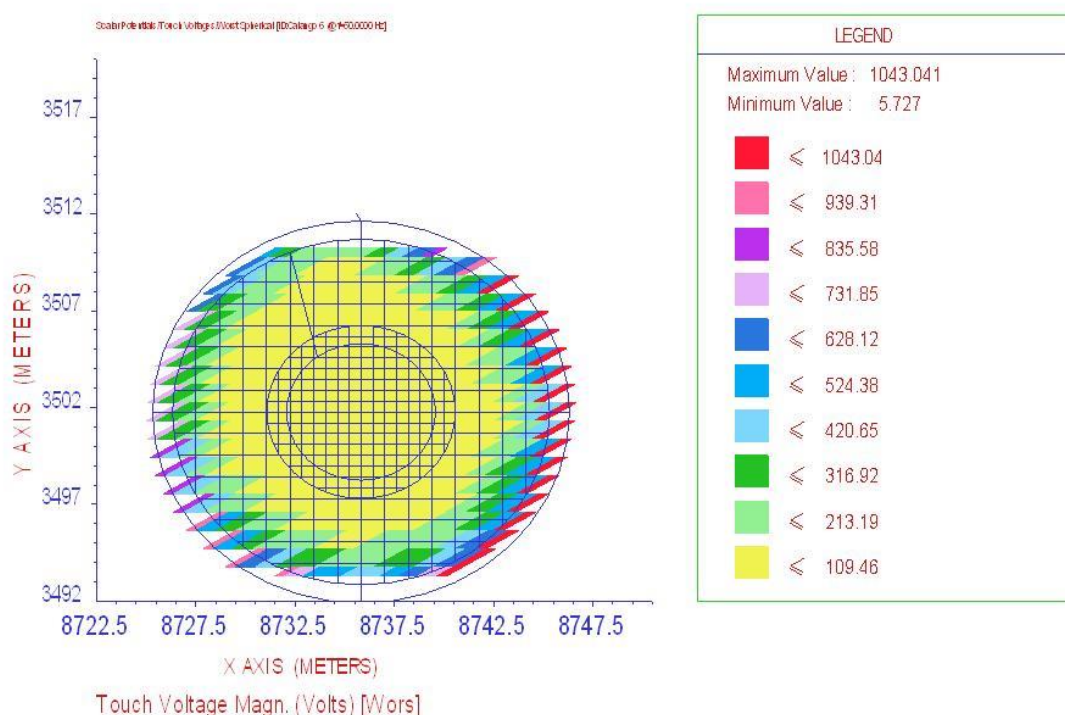


Figura 19: Simulación de la tensión de contacto del aerogenerador 6 del parque eólico Calango 6 utilizando CDEGS

La imagen anterior se muestra el peor caso de todos, que hace referencia al aerogenerador 6 del parque eólico de Calango 6. Es el mayor valor de tensión de contacto de todos los aerogeneradores y cumple con facilidad el criterio de seguridad establecido por la norma IEC 61936-1 anteriormente comentada. El motivo por el cual se ha elegido representar como ejemplo la tensión de contacto es que la tensión de paso es significativamente más baja, de tal forma que el criterio de seguridad lo cumple holgadamente. A pesar de que la tensión de paso tiene un límite de tensión mayor, generalmente los valores que se obtienen después de simular son menores que los de la tensión de contacto. La Figura 5 demuestra esta afirmación, es decir, la diferencia de tensión entre la superficie y la persona tocando la torre de la turbina es mayor que la diferencia de tensión conocida como tensión de paso.

En la Figura 19, aparecen varios valores de tensión, pero el que interesa es el menor, ya que el lugar donde hay que fijarse es el primer anillo interior, que es el anillo de cobre interno colocado a un metro de distancia de la torre, el punto donde se analiza la tensión de contacto. Por lo tanto, la tensión de contacto que hay que analizar es de 109,46 V.

En el Anexo C se muestran los resultados de la tensión de paso y de contacto de cada aerogenerador. Hay que destacar que el mayor valor de la tensión de paso se ha registrado en la misma turbina, es decir, en la turbina 6 del parque eólico Calango 6, con un valor de 58,31 V.

El diseño de la puesta a tierra de la subestación es diferente al de un aerogenerador. A pesar de tener la misma tensión límite para cumplir con la norma, es esencial mantener una tensión baja, ya que dentro de la subestación puede haber personas o equipos eléctricos que deben ser protegidos de cualquier falta.

Después de dibujar la malla de puesta a tierra de la subestación y simularla con CDEGS, los resultados obtenidos se muestran en las siguientes imágenes.

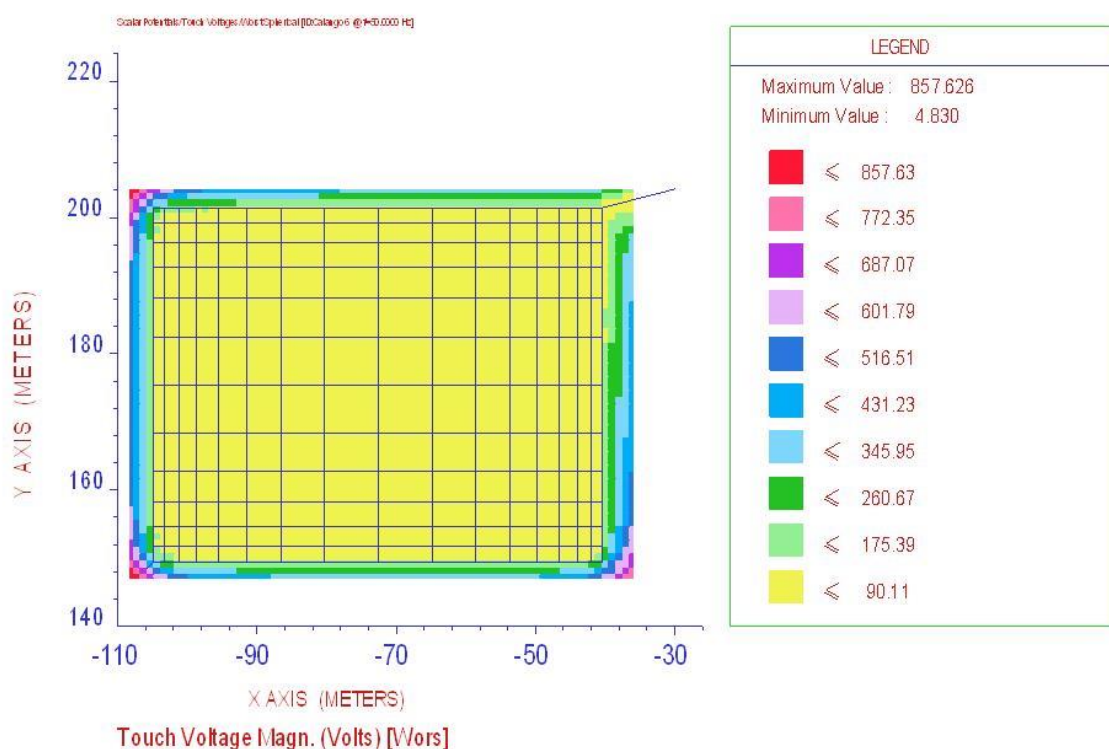


Figura 20: Simulación de la tensión de contacto de la subestación utilizando CDEGS

En la imagen superior se representa la malla de la subestación junto con el perfil de tensiones de contacto. Hay que destacar que el perímetro de la malla sobresale un metro del perímetro de la estructura de la propia subestación, para así crear una superficie equipotencial mayor y aportar seguridad a las personas o equipos que pudieran estar en ese lugar. Se observa cómo cuanto más lejos de la subestación se analiza la tensión, más valor tiene. Sigue una

disposición típica, que el mayor valor de tensión de contacto se encuentra en las esquinas. El valor de tensión de contacto que hay que tener en cuenta es de 90,11 V, ya que es en el lugar donde más peligro puede haber.

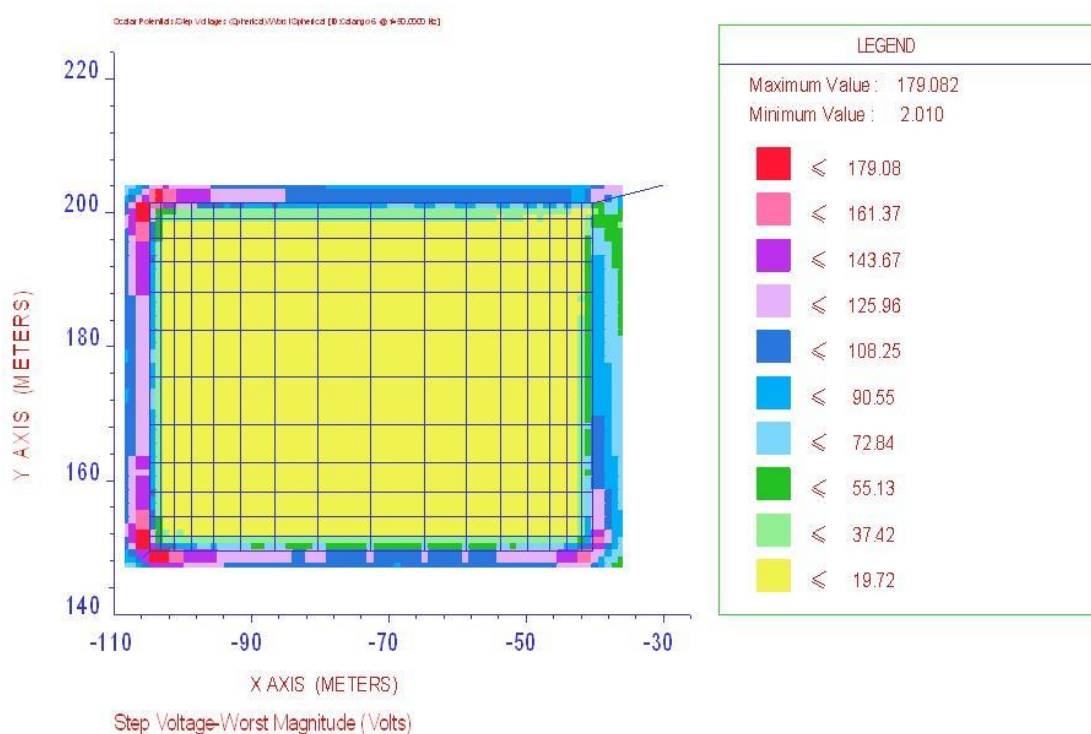


Figura 21: Simulación de la tensión de paso de la subestación utilizando CDEGS

En la Figura 21 se muestra la tensión de paso de la subestación que es significativamente menor que la tensión de contacto. Además, el límite permisible de la tensión de paso es superior al de la tensión de contacto, por lo que cumple el criterio.

5. Conclusiones

El propósito de este proyecto era obtener principalmente una mejor comprensión de la forma de abordar un proyecto dado desde una perspectiva industrial o empresarial. En otras palabras, se ha hecho hincapié en la importancia del cumplimiento de los plazos, que forma parte del trabajo en equipo con el fin de cumplir con las especificaciones del cliente y, finalmente, trabajar en proyectos que tienen presupuestos particulares que se les asignan. Esto es absolutamente una manera distinta de abordar las tareas, especialmente cuando se compara con la perspectiva del estudiante.

Además, este estudio ha ayudado a mejorar los conocimientos sobre el diseño de sistemas de puesta a tierra de parques eólicos en tierra. Con la demanda ascendente actual de las energías renovables y con la mentalidad de la sociedad más mentalizada con el respeto al medioambiente, este proyecto es muy actual y atractivo.

Este informe ayuda a probar que los objetivos expuestos al comienzo se lograron y que los conocimientos obtenidos relacionados con el propio diseño del sistema de puesta a tierra y la elevación del potencial de tierra, por ejemplo, están claramente definidos. Además, se ha obtenido la experiencia práctica y el conocimiento en los softwares de puesta a tierra CDEGS y WinIGS.

Una vez analizado el conjunto de los parques eólicos de Calango 6, Santana I y Santana II, hay que destacar que inicialmente al obtener el modelo del suelo global del conjunto de parques eólicos los valores de resistividad son muy altos, pero como seguidamente se analizará, se compensa con la distancia de cable de tierra que hay enterrado, ya que al ser una malla muy grande, ayuda a disipar mejor la corriente de falta.

Se debe comentar que dado que se han impuesto los diseños de la malla de los aerogeneradores y de la subestación, no ha habido posibilidad de realizar demasiados cambios para cumplir con la normativa.

Otro objetivo que se ha mencionado en este informe es el de validar la malla de tierra proyectada para los parques eólicos Calango 6, Santana I y Santana II cumpliendo con la norma IEC 61936-1, por lo que como en el Anexo C se puede comprobar, todas las tensiones de paso y de contacto cumplen con el criterio establecido.

En la siguiente imagen se muestra la tensión de contacto permitida extraída de la norma IEC 61936-1 y con color rojo el límite permitido para la condición establecida para este proyecto, que es 0.5 segundos de falta. De esta manera, la tensión máxima de contacto es de 175 V.

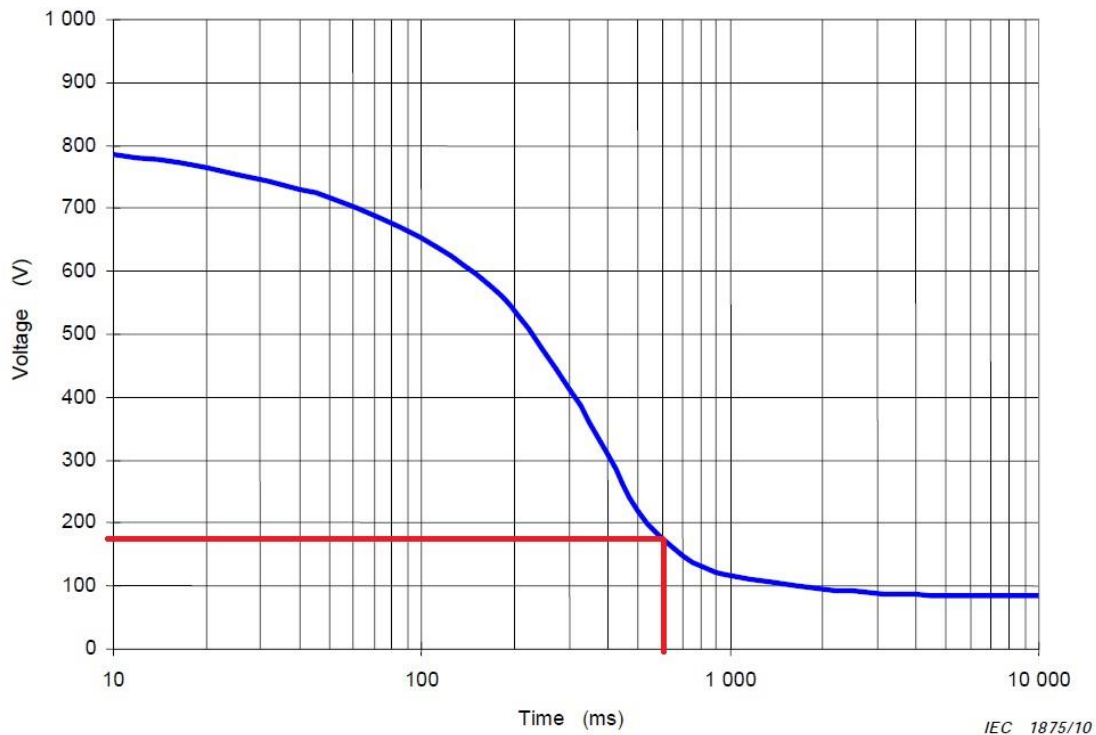


Figura 22: Tensión de paso permitida con las especificaciones de este proyecto

Una vez que se comparan todas las tensiones de contacto de los aerogeneradores y de la propia subestación, hay que mencionar que ninguna de ellas sobrepasa dicho límite. Por lo tanto, la malla de tierra proyectada es válida y correcta para su ejecución. Ninguno de los valores de tensión de contacto pasa de los 109.46 V, que es el aerogenerador que mayor tensión de contacto presenta, y claramente se observa que ese valor es menor a 175 V, que es el límite impuesto por la norma IEC 61936-1 con las especificaciones de este proyecto. Respecto a las tensiones de paso hay que comentar que tienen límites mayores que las de contacto, así que como en todas las simulaciones realizadas se obtienen tensiones de paso menores a las de contacto, se demuestra que cumplen significativamente con los requerimientos establecidos.

Las tensiones de paso y contacto se medirán una vez que estén todos los parques eólicos montados, con el fin de comprobar la seguridad del sistema y la necesidad o no de realizar acciones correctivas. Se realiza este procedimiento dado a la alta resistividad en las ubicaciones de las máquinas (concretamente cerca de los $50.000 \Omega \cdot m$) y la alta incertidumbre derivada.

Es de suma importancia la acera perimetral que se ha colocado en los aerogeneradores con su ferralla conectada a la malla de tierra del sistema, ya que así, se reducen las tensiones de paso y de contacto de los aerogeneradores cumpliendo con la normativa. También hay que resaltar que en la subestación se colocará una capa superficial de $3000 \Omega \cdot m$ para aumentar el límite de las pensiones de paso y de contacto y así dar mayor seguridad de las personas y equipos que se encuentren en ese lugar.

Con todo esto, se ha realizado de manera correcta el diseño de la malla de puesta a tierra de los parques eólicos de Calango 6, Santana I y Santana II y se ha comprobado que tanto las tensiones de paso y las de contacto cumplen con los requisitos de la norma IEC 619436-1.

6. Líneas Futuras

Cualquier proyecto de investigación desarrollado con un mínimo de entusiasmo contribuye a cumplir con algunos objetivos establecidos pero, de forma simultánea, genera nuevas preguntas, nuevas ideas y/o abre nuevas vías de trabajo. En este apartado se presentan algunas líneas de trabajo que pueden ser objeto de interés, atendiendo al trabajo expuesto este informe.

El trabajo adicional que se podría hacer para mejorar y contrastar los resultados obtenidos es el de realizar el mismo análisis pero con un software distinto. El inconveniente de esto es que se necesita una licencia para ello y, dado que son muy específicos, los precios de las mismas son relativamente elevados.

Durante el tiempo que se ha realizado este proyecto con el software CDEGS, también se ha intentado con otro, pero es bastante más complejo y exige más datos de los que es complicado tener en una posición como estudiante, sin demasiados recursos para la obtención de los mismos.

El software analizado es el WinIGS que en él se puede modelar la resistividad del suelo de cada turbina y de la subestación eléctrica, no la global del parque como en CDEGS. De esta manera, se tiene un modelo y un análisis mucho más específico y concreto. Además de eso, se pueden concretar las características técnicas del generador, los cables de baja tensión, el transformador elevador de la turbina y los cables de media tensión que recorren el parque, así como el transformador elevador de la subestación eléctrica. Tiene un interfaz con el usuario muy intuitivo, pero tal y como se ha comentado anteriormente, los datos que se precisan son muy concretos y numerosos. De esta manera, se puede realizar un análisis muy fino y exhaustivo. A continuación se muestra una imagen del interfaz con el usuario de un conjunto de 15 aerogeneradores.

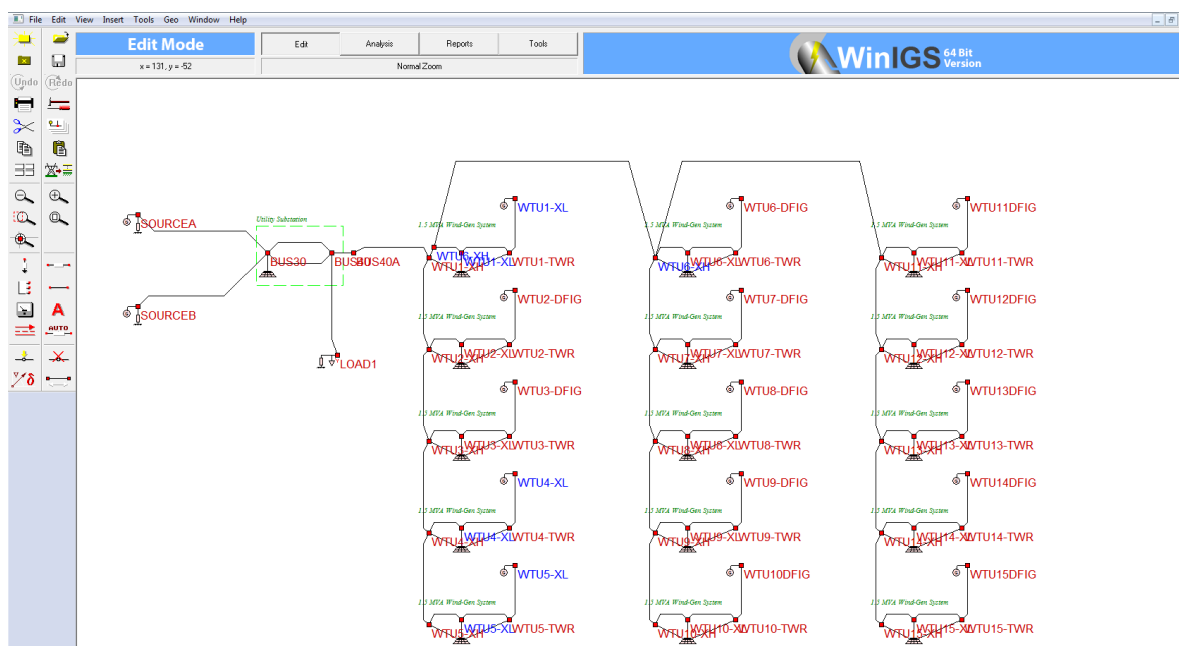


Figura 23: Software WinIGS, interfaz principal

En esta imagen se puede observar un parque eólico formado por 15 turbinas y la subestación eléctrica. Dentro de cada turbina se puede configurar el sistema de puesta a tierra, las características eléctricas, la configuración de los cables, etc.

Por resumir, destacar que sería de gran interés hacer el mismo estudio que se ha hecho con CDEGS con WinIGS y así comparar los resultados y ver si la malla diseñada en uno es también válida en el otro cumpliendo con la norma IEC 61936-1.

7. Referencias

- [1] I. Colominas, F. Navarrina, and M. Casteleiro, "Analysis of transferred Earth potentials in grounding systems: a BEM numerical approach," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 20, pp. 339-345, 2005.
- [2] M. Nassereddine, J. Rizk, and A. Hellany, "How to design an effective earthing system to ensure the safety of the people" in *Advances in Computational Tools for Engineering Applications, 2009. ACTEA '09. International Conference on*, 2009, pp. 416-421.
- [3] H. Zhiqiang, W. Xishan, and W. Jianwu, "Optimization Design of Substation Grounding Grid Based on Genetic Algorithm," in *Natural Computation, 2007. ICNC 2007. Third International Conference on*, 2007, pp. 140-144.
- [4] "IEC Power installations exceeding 1 kV a.c." *IEC 61936-1*, 2010.
- [5] Charlton, Trevor. "Chapter 4 – Soil Resistivity Measurement and Interpretation." Power System Earthing Course. Strategy and Solutions Ltd. Henstaff Court Business Centre, Cardiff. 19 Sept. 2011. Lecture.
- [6] "Earthing Techniques." *Earthing Techniques*. Lightning & Surge Technologies, n.d. Web. 17 Nov. 2013. <<http://www.lightningman.com.au/Earthing.pdf>>.
- [7] W. Ruan, R. D. Southey, S. Fortin, and F. P. Dawalibi, "Effective Sounding Depths for HVDC Grounding Electrode Design: Wenner versus Schlumberger Methods," in *Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific, 2005 IEEE/PES*, 2005, pp. 1-7.
- [8] F. B. Uzunlar and O. Kalenderli, "Three dimensional grounding grid design," in *Electrical and Electronics Engineering, 2009. ELECO 2009. International Conference on*, 2009, pp. I-139-I-143.
- [9] W. D. Carman, R. J. Hughes, and G. J. Skinner, "A coordinated earthing system design methodology for substations," in *Electricity Distribution, 1993. CIREN. 12th International Conference on*, 1993, pp. 2.18/1-2.18/5 vol.2.
- [10] L. Grcev, V. Filiposki, and V. Arnaudovski, "Ground potential rise influence near HV substations in urban areas," in *Electricity Distribution, 2001. Part 1: Contributions. CIREN. 16th International Conference and Exhibition on (IEE Conf. Publ No. 482)*, 2001, p. 5 pp. vol.2.
- [11] Prasad, Dwarka, and H.C. Sharma. "Significance of Step and Touch Voltages." *International Journal of Soft Computing and Engineering (IJSCE)* 1.5 (2011): 193-197. *Significance of Step and Touch Voltages*. Web. 26 Nov. 2013.
- [12] "IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding," *IEEE Std 80-2000*, pp. i-192, 2000.

- [13] "IEC Wind turbines. Part 24: Lightning protection" *IEC 61400-24*, 2010.
- [14] Erichsen, Hans V.. "Lightning protection of Wind Turbines." *Lightning protection of Wind Turbines*. Electricon, 14 Oct. 2011. Web. 27 Nov. 2013. <http://www.serec.ethz.ch/EVENTS%20WEF%202011/LIGHTNING_14OCT11/6_Lightning%20protection%20of%20wind%20turbines_ERICHSEN.pdf>.
- [15] "Lightning and overvoltage protection." *Lightning and overvoltage protection*. ABB, n.d. Web. 2 Dec. 2013. <[http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/48cf34079cd1d31cc125733a004ebf39/\\$file/2ctc432002b0201.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/48cf34079cd1d31cc125733a004ebf39/$file/2ctc432002b0201.pdf)>.

8. Anexos

Anexo A: *Medidas de resistividad del suelo y espacio entre picas*

Anexo B:

Parte 1: Imagen del interfaz con el módulo RESAP de CDEGS

Parte 2: Gráficas de Resistividad – Espacio entre picas

Anexo C: *Tensiones de paso y de contacto de los parques eólicos Calango 6, Santana I y Santana II*

ANEXO A

Medidas de resistividad del suelo y espacio entre picas

Parque eólico Calango 6

Calango 6 - 01		
Medidas	Distancia entre picas (m)	Resistividad (Ω m)
1	1	12500
2	2	22500
3	4	35000
4	8	46150
5	16	50000
6	32	50000

Calango 6 - 02		
Medidas	Distancia entre picas (m)	Resistividad (Ω m)
1	1	582
2	2	2412
3	4	6375
4	8	14967
5	16	17352
6	32	50000

Calango 6 - 03		
Medidas	Distancia entre picas (m)	Resistividad (Ω m)
1	1	2350
2	2	6750
3	4	13325
4	8	36150
5	16	50000
6	32	50000

Calango 6 - 04		
Medidas	Distancia entre picas (m)	Resistividad (Ω m)
1	1	2825
2	2	4850
3	4	10950
4	8	22300
5	16	35025
6	32	25793

Calango 6 - 05		
Medidas	Distancia entre picas (m)	Resistividad (Ω m)
1	1	618,75
2	2	1250
3	4	2675
4	8	3775
5	16	10500
6	32	903,25

Calango 6 - 06		
Medidas	Distancia entre picas (m)	Resistividad (Ω m)
1	1	20650
2	2	31675
3	4	44825
4	8	49925
5	16	50000
6	32	50000

Calango 6 - 07		
Medidas	Distancia entre picas (m)	Resistividad (Ω m)
1	1	2850
2	2	6125
3	4	12925
4	8	28225
5	16	37425
6	32	25418

Calango 6 - 08		
Medidas	Distancia entre picas (m)	Resistividad (Ω m)
1	1	3300
2	2	4000
3	4	16700
4	8	34450
5	16	34075
6	32	37534

Calango 6 - 09		
Medidas	Distancia entre picas (m)	Resistividad (Ω m)
1	1	14900
2	2	27050
3	4	27900
4	8	47150
5	16	50000
6	32	50000

Calango 6 - 10		
Medidas	Distancia entre picas (m)	Resistividad (Ω m)
1	1	26875
2	2	28450
3	4	47825
4	8	48175
5	16	50000
6	32	50000

Calango 6 - 11		
Medidas	Distancia entre picas (m)	Resistividad (Ω m)
1	1	2950
2	2	4825
3	4	8025
4	8	12425
5	16	13025
6	32	14325

Calango 6 - 12		
Medidas	Distancia entre picas (m)	Resistividad (Ω m)
1	1	3800
2	2	7325
3	4	9950
4	8	13500
5	16	4900
6	32	4925

Calango 6 - Parque completo		
Medidas	Distancia entre picas (m)	Resistividad (Ω m)
1	1	7071,72
2	2	11307,47
3	4	17805,33
4	8	27701,13
5	16	30827,93
6	32	32601,55

Calango 6 - 13		
Medidas	Distancia entre picas (m)	Resistividad (Ω m)
1	1	1725
2	2	3300
3	4	6750
4	8	6550
5	16	1867
6	32	800

Calango 6 - 14		
Medidas	Distancia entre picas (m)	Resistividad (Ω m)
1	1	4550
2	2	8400
3	4	9880
4	8	22000
5	16	31900
6	32	29325

Calango 6 - 15		
Medidas	Distancia entre picas (m)	Resistividad (Ω m)
1	1	5600
2	2	10700
3	4	13975
4	8	29775
5	16	26350
6	32	50000

Calango 6 - TM		
Medidas	Distancia entre picas (m)	Resistividad (Ω m)
1	1	17250
2	2	20125
3	4	25850
4	8	30575
5	16	37227
6	32	49850

Parque eólico Santana I

Santana I - 01		
Medidas	Distancia entre picas (m)	Resistividad (Ωm)
1	1	13102
2	2	21650
3	4	31797
4	8	34282
5	16	40637
6	32	45632

Santana I - 02		
Medidas	Distancia entre picas (m)	Resistividad (Ωm)
1	1	11052
2	2	18512
3	4	18490
4	8	24992
5	16	11552
6	32	50000

Santana I - 03		
Medidas	Distancia entre picas (m)	Resistividad (Ωm)
1	1	15342
2	2	22262
3	4	22277
4	8	15382
5	16	13255
6	32	44377

Santana I - 04		
Medidas	Distancia entre picas (m)	Resistividad (Ωm)
1	1	13282
2	2	20910
3	4	28687
4	8	35830
5	16	48940
6	32	50000

Santana I - 05		
Medidas	Distancia entre picas (m)	Resistividad (Ωm)
1	1	25925
2	2	31100
3	4	38600
4	8	45700
5	16	50000
6	32	50000

Santana I - 06		
Medidas	Distancia entre picas (m)	Resistividad (Ωm)
1	1	19150
2	2	24550
3	4	31252
4	8	42237
5	16	49205
6	32	50000

Santana I - 07		
Medidas	Distancia entre picas (m)	Resistividad (Ωm)
1	1	13875
2	2	33650
3	4	19100
4	8	20050
5	16	42775
6	32	50000

Santana I - 08		
Medidas	Distancia entre picas (m)	Resistividad (Ωm)
1	1	46000
2	2	42225
3	4	38825
4	8	45625
5	16	50000
6	32	50000

Santana I - 09		
Medidas	Distancia entre picas (m)	Resistividad (Ωm)
1	1	33475
2	2	44325
3	4	37405
4	8	44700
5	16	50000
6	32	50000

Santana I - 10		
Medidas	Distancia entre picas (m)	Resistividad (Ωm)
1	1	30100
2	2	38425
3	4	45250
4	8	42825
5	16	50000
6	32	50000

Santana I - 11		
Medidas	Distancia entre picas (m)	Resistividad (Ωm)
1	1	20975
2	2	28975
3	4	39525
4	8	46475
5	16	50000
6	32	50000

Santana I - 12		
Medidas	Distancia entre picas (m)	Resistividad (Ωm)
1	1	20650
2	2	26700
3	4	30800
4	8	37850
5	16	45447
6	32	50000

Santana I - Parque completo		
Medidas	Distancia entre picas (m)	Resistividad (Ωm)
1	1	20173,8
2	2	27223,4
3	4	30457,5
4	8	35239,0
5	16	39935,7
6	32	48776,7

Santana I - 13		
Medidas	Distancia entre picas (m)	Resistividad (Ωm)
1	1	15060
2	2	22112
3	4	29675
4	8	33677
5	16	45627
6	32	50000

Santana I - 14		
Medidas	Distancia entre picas (m)	Resistividad (Ωm)
1	1	12782
2	2	16690
3	4	25410
4	8	34155
5	16	25250
6	32	44167

Santana I - 15		
Medidas	Distancia entre picas (m)	Resistividad (Ωm)
1	1	11837
2	2	16265
3	4	19770
4	8	24805
5	16	26347
6	32	47475

Santana I - TM		
Medidas	Distancia entre picas (m)	Resistividad (Ωm)
1	1	18242
2	2	26200
3	4	33532
4	8	38330
5	16	46925
6	32	45825

Parque eólico Santana II

Santana II - 01		
Medidas	Distancia entre picas (m)	Resistividad (Ωm)
1	1	10092
2	2	21220
3	4	26192
4	8	36262
5	16	50000
6	32	50000

Santana II - 05		
Medidas	Distancia entre picas (m)	Resistividad (Ωm)
1	1	12647
2	2	14435
3	4	22685
4	8	36045
5	16	43032
6	32	49635

Santana II - 02		
Medidas	Distancia entre picas (m)	Resistividad (Ωm)
1	1	19612
2	2	37027
3	4	41120
4	8	50000
5	16	33097
6	32	50000

Santana II - 06		
Medidas	Distancia entre picas (m)	Resistividad (Ωm)
1	1	10375
2	2	13500
3	4	21400
4	8	19425
5	16	33750
6	32	5375

Santana II - 03		
Medidas	Distancia entre picas (m)	Resistividad (Ωm)
1	1	13382
2	2	19262
3	4	23460
4	8	15627
5	16	39745
6	32	47482

Santana II - 07		
Medidas	Distancia entre picas (m)	Resistividad (Ωm)
1	1	10375
2	2	13500
3	4	21400
4	8	19425
5	16	33750
6	32	5375

Santana II - 04		
Medidas	Distancia entre picas (m)	Resistividad (Ωm)
1	1	11797
2	2	16442
3	4	27767
4	8	38347
5	16	8232
6	32	47245

Santana II - 08		
Medidas	Distancia entre picas (m)	Resistividad (Ωm)
1	1	3700
2	2	6225
3	4	9975
4	8	17250
5	16	27925
6	32	7000

Santana II - 09		
Medidas	Distancia entre picas (m)	Resistividad (Ωm)
1	1	8200
2	2	12350
3	4	13525
4	8	21500
5	16	30375
6	32	49975

Santana II - 10		
Medidas	Distancia entre picas (m)	Resistividad (Ωm)
1	1	6400
2	2	8675
3	4	11100
4	8	11775
5	16	7175
6	32	18150

Santana II - 11		
Medidas	Distancia entre picas (m)	Resistividad (Ωm)
1	1	6550
2	2	9375
3	4	11125
4	8	13125
5	16	34775
6	32	5375

Santana II - 12		
Medidas	Distancia entre picas (m)	Resistividad (Ωm)
1	1	3550
2	2	6625
3	4	9100
4	8	11350
5	16	4475
6	32	4075

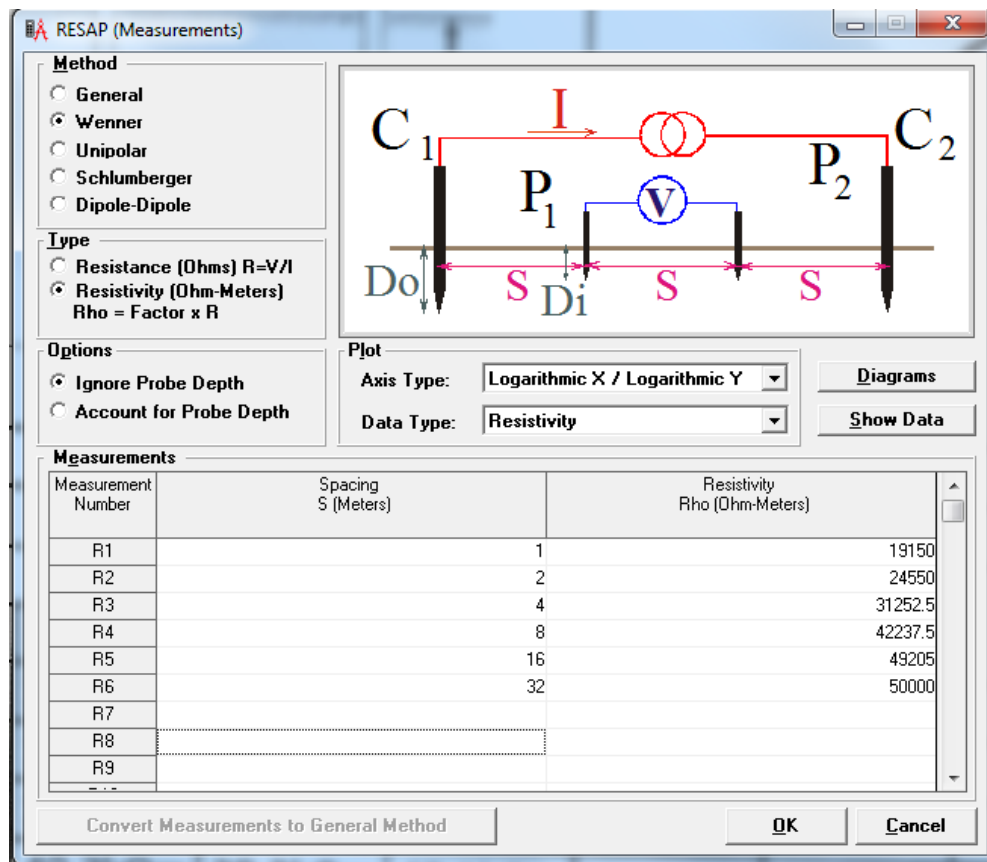
Santana II - TM		
Medidas	Distancia entre picas (m)	Resistividad (Ωm)
1	1	4225
2	2	6400
3	4	8500
4	8	13250
5	16	3950
6	32	23850

Santana II - Parque completo		
Medidas	Distancia entre picas (m)	Resistividad (Ωm)
1	1	9723,3
2	2	14886,3
3	4	19904,1
4	8	24177,6
5	16	28860,9
6	32	28307,3

Calango 6, Santana I y Santana II - Conjunto		
Medidas	Distancia entre picas (m)	Resistividad (Ωm)
1	1	12323,0
2	2	17805,7
3	4	22722,3
4	8	29039,2
5	16	33208,2
6	32	36561,8

ANEXO B

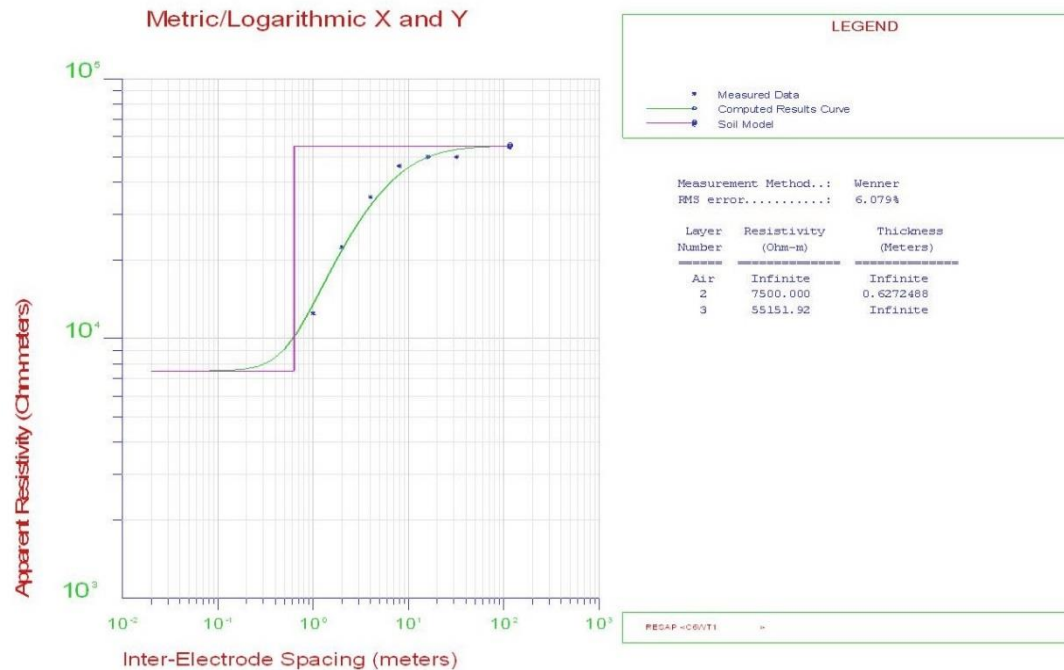
Parte 1: Imagen del interfaz con el módulo RESAP de CDEGS



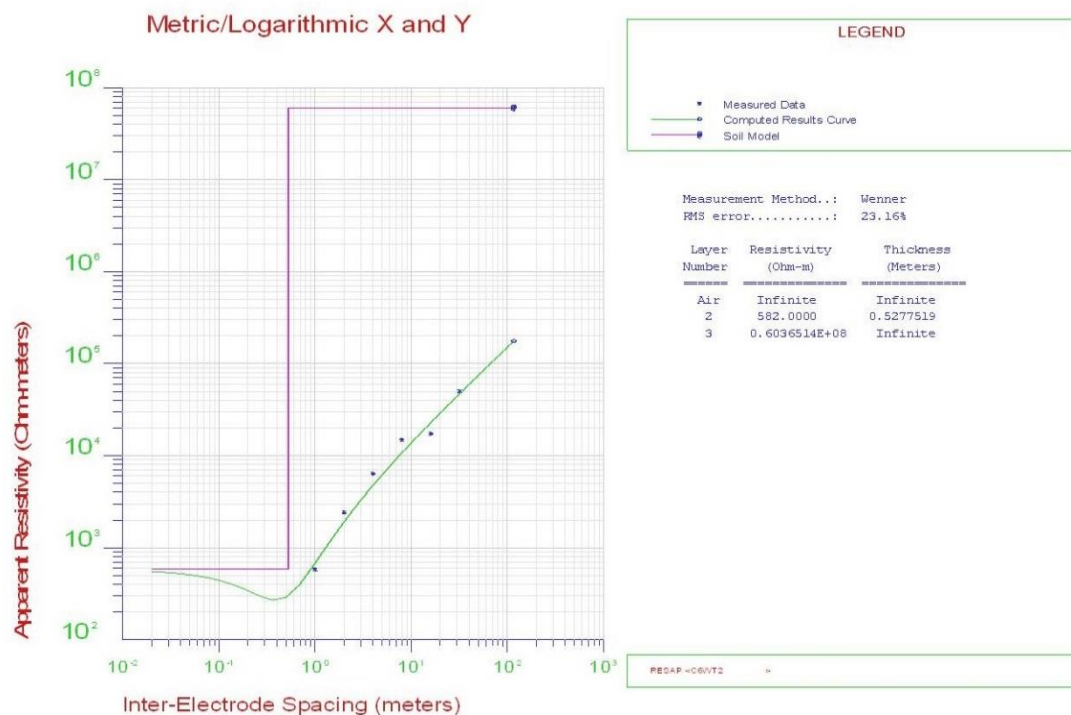
Parte 2: Gráficas de Resistividad – Espacio entre picas

Parque eólico Calango 6

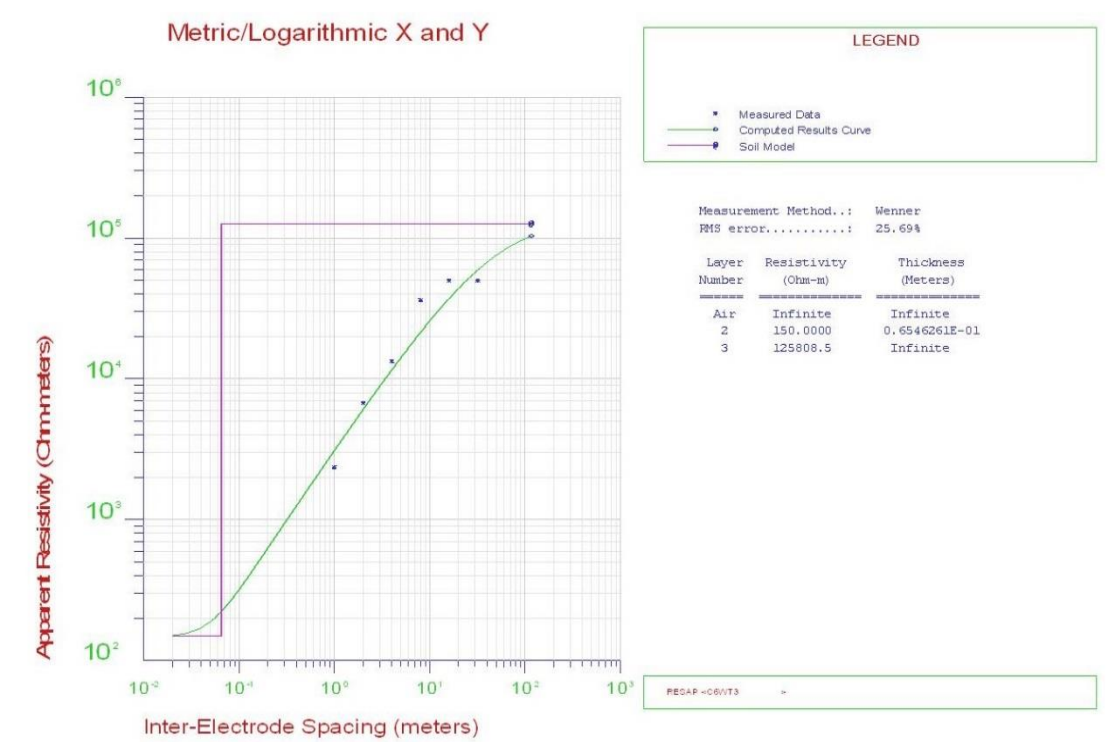
Turbina 1



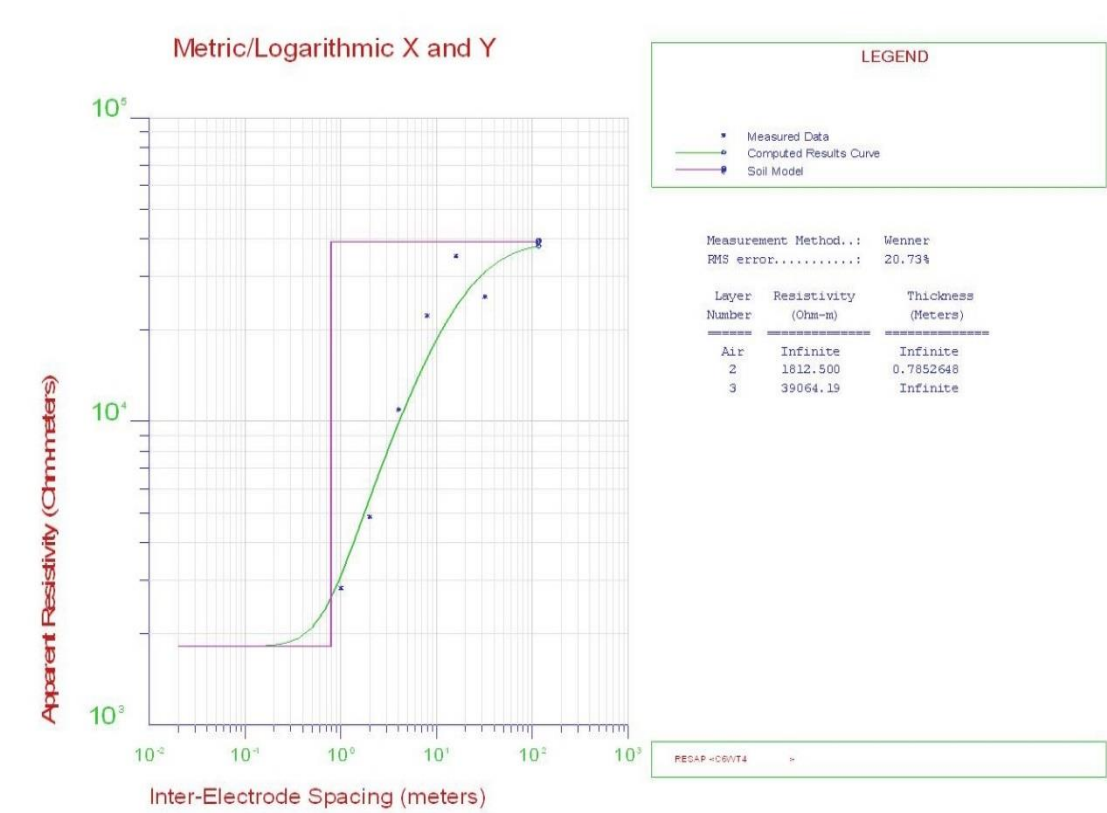
Turbina 2



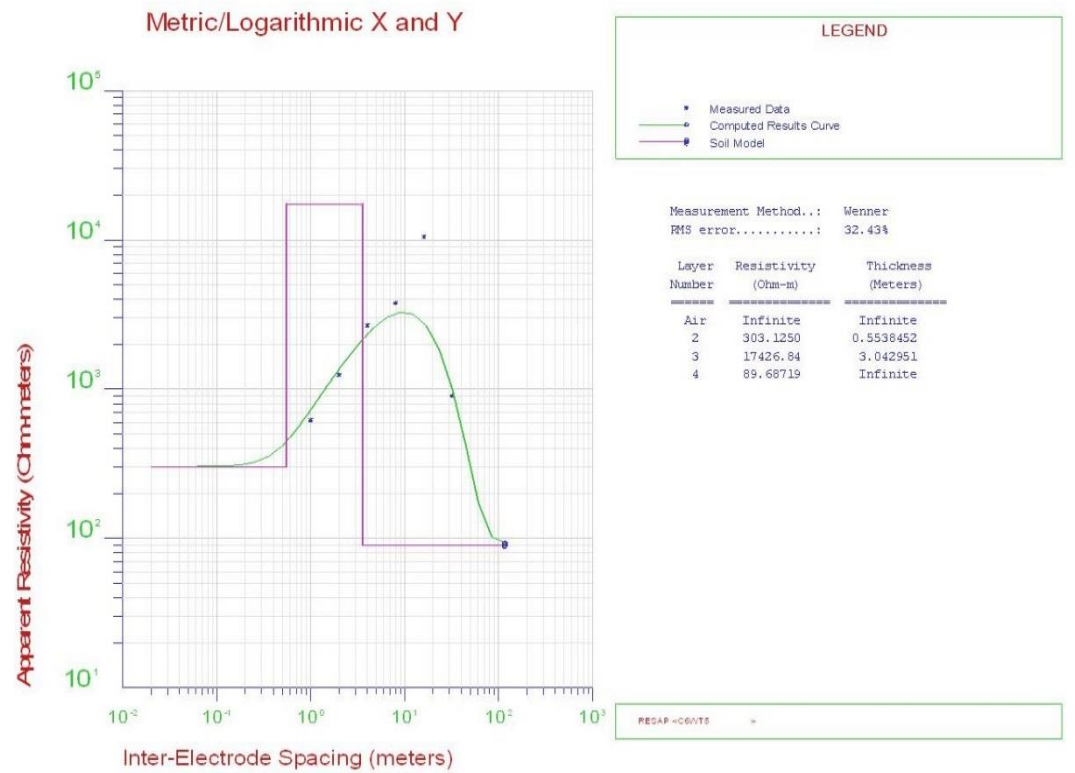
Turbina 3



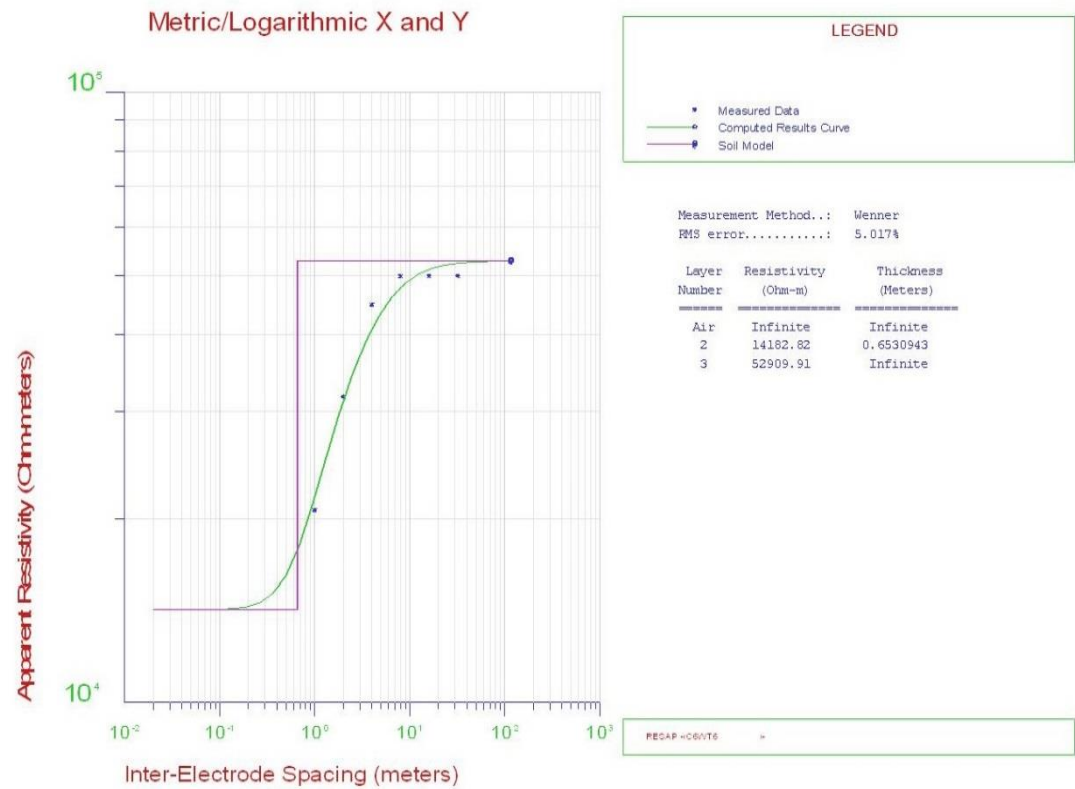
Turbina 4



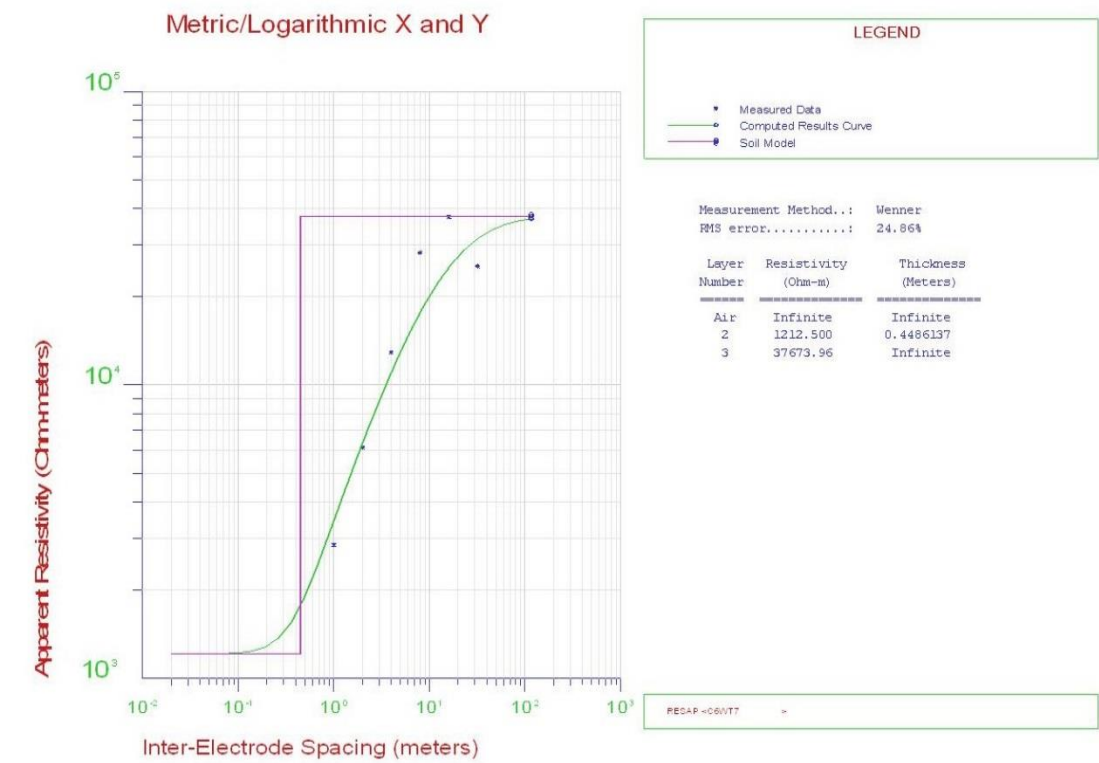
Turbina 5



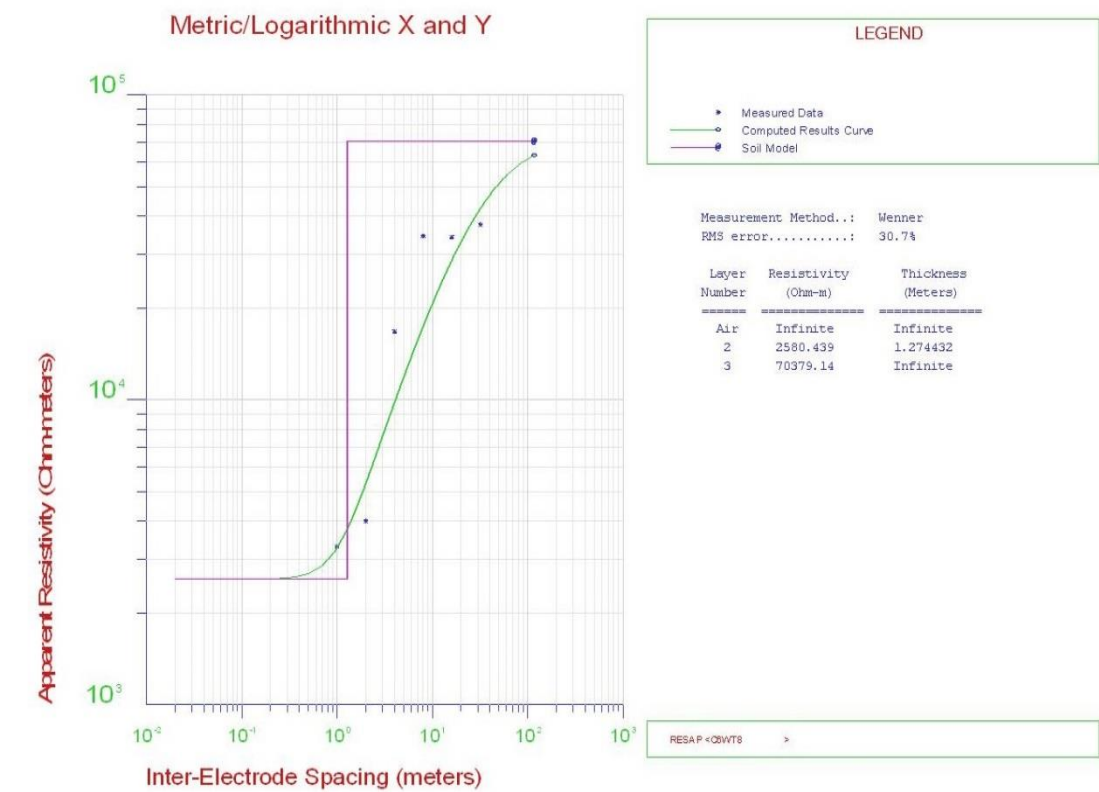
Turbina 6



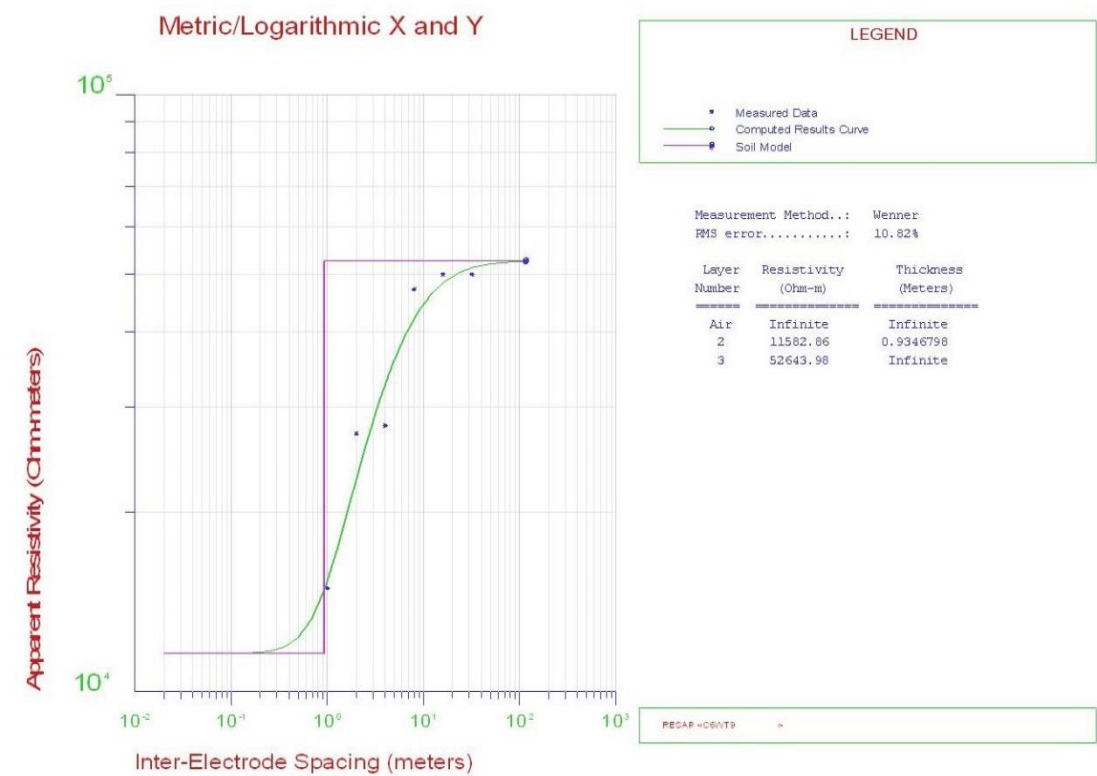
Turbina 7



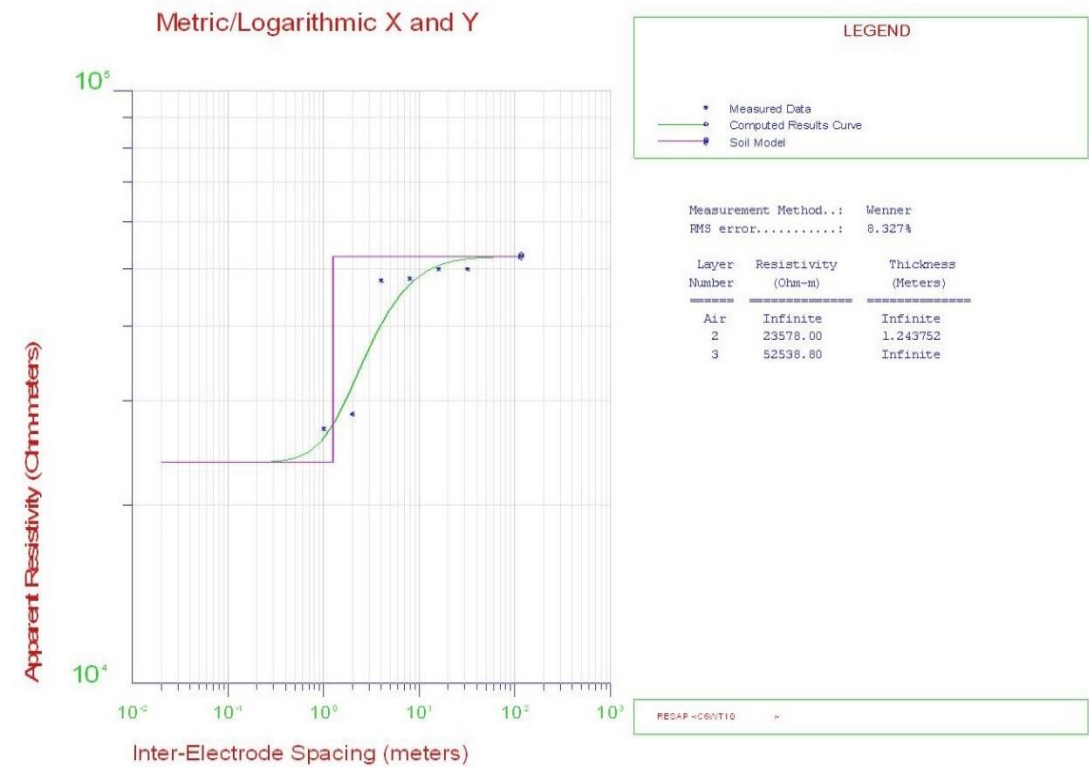
Turbina 8



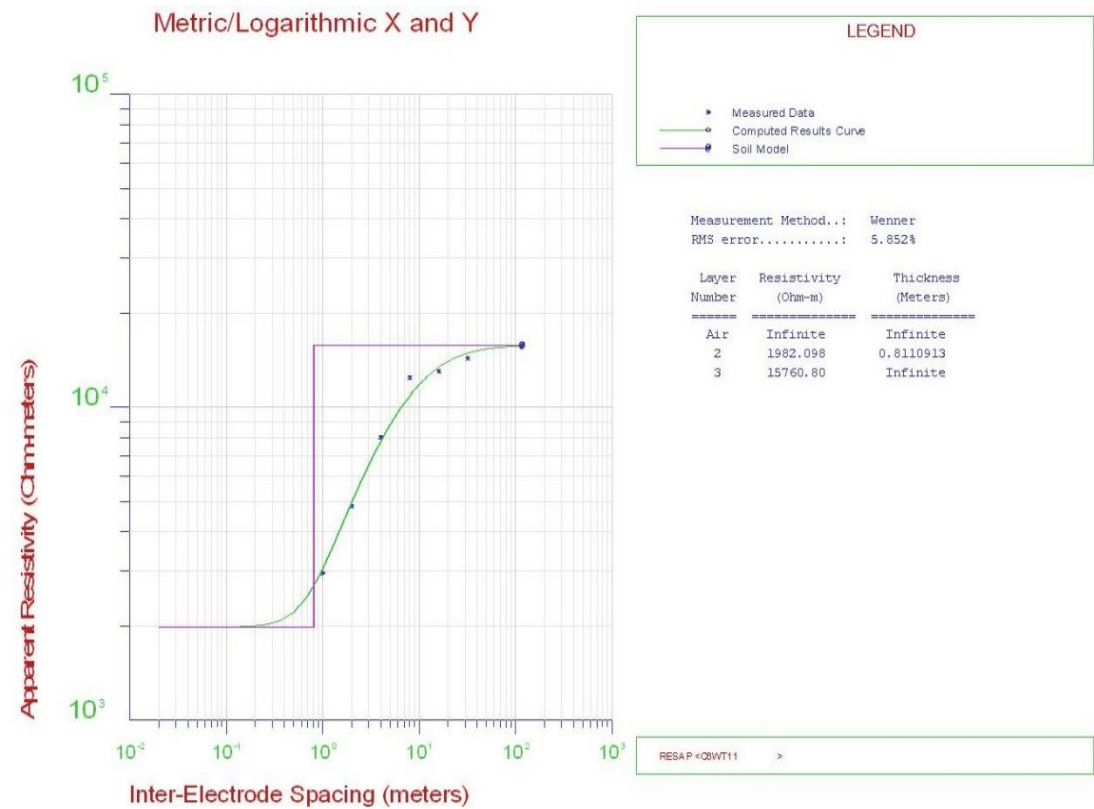
Turbina 9



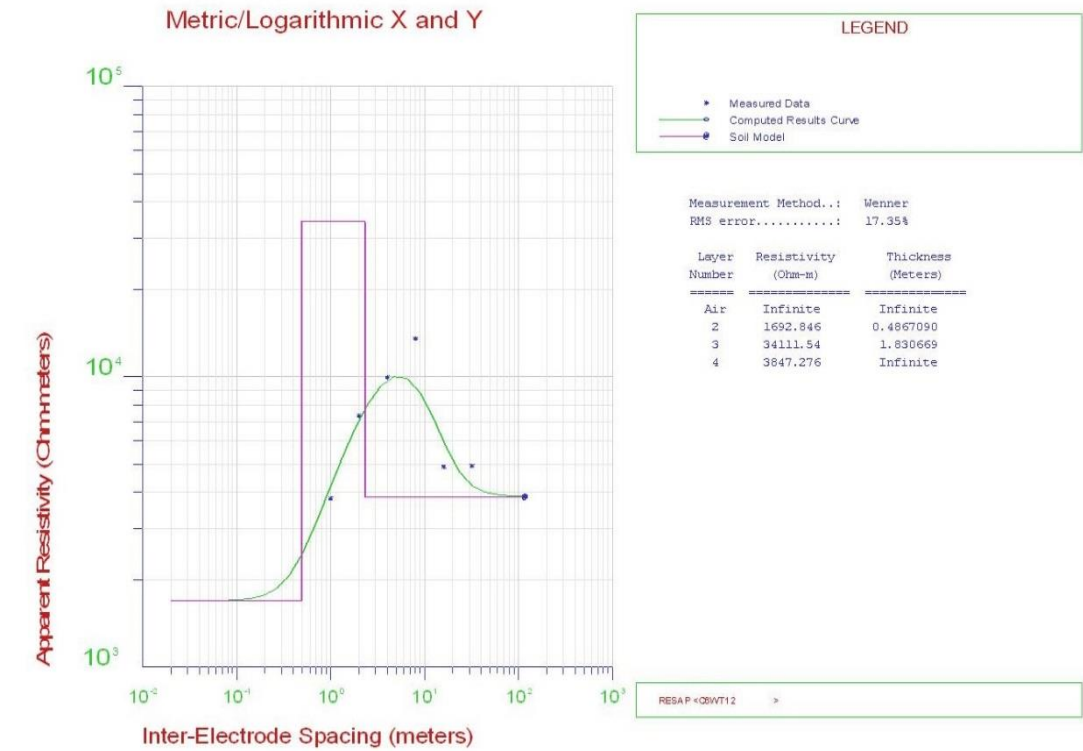
Turbina 10



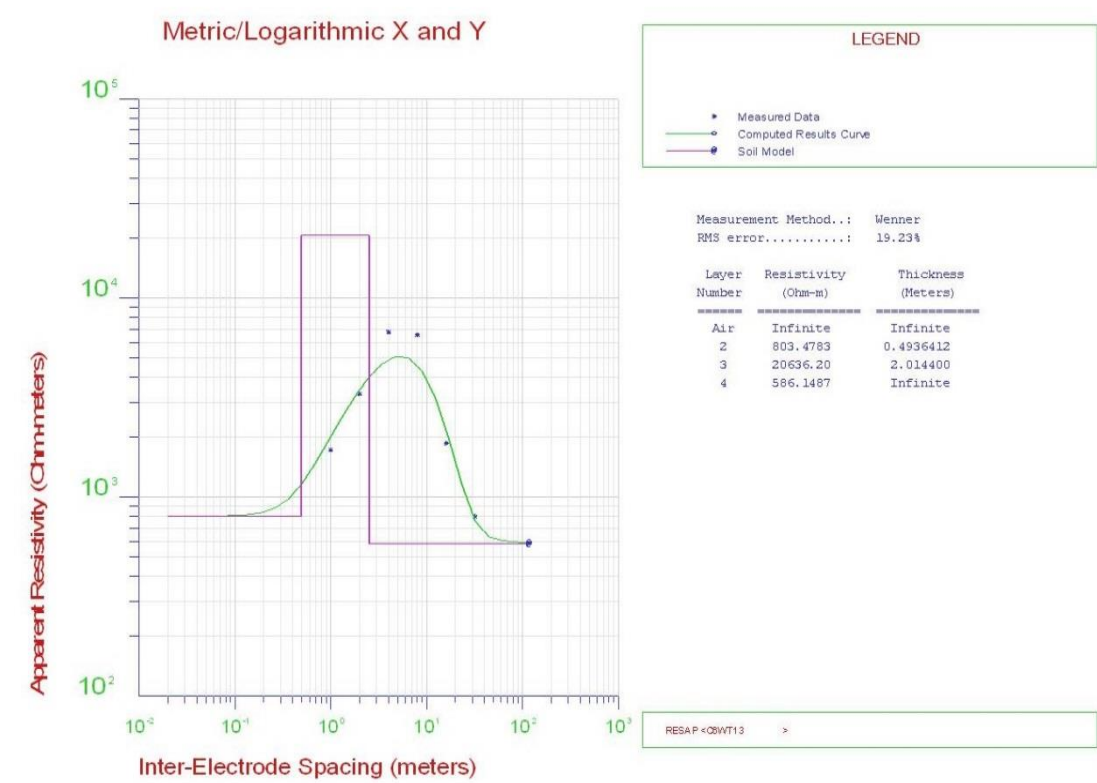
Turbina 11



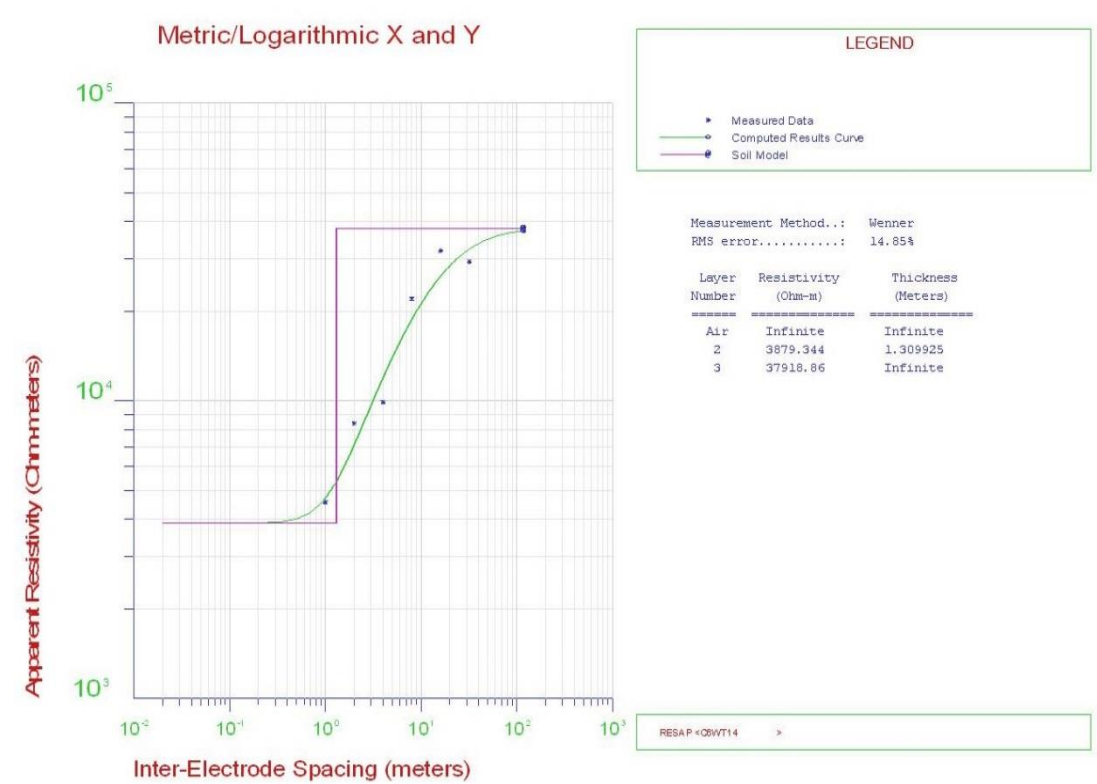
Turbina 12



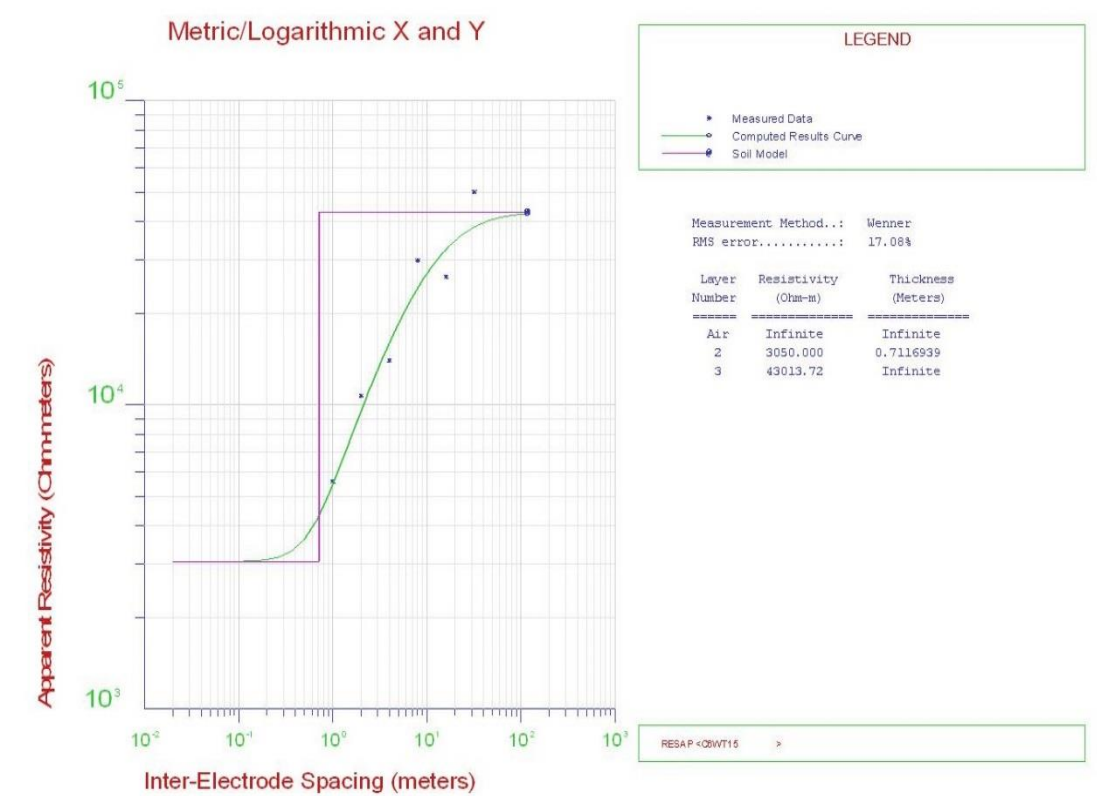
Turbina 13



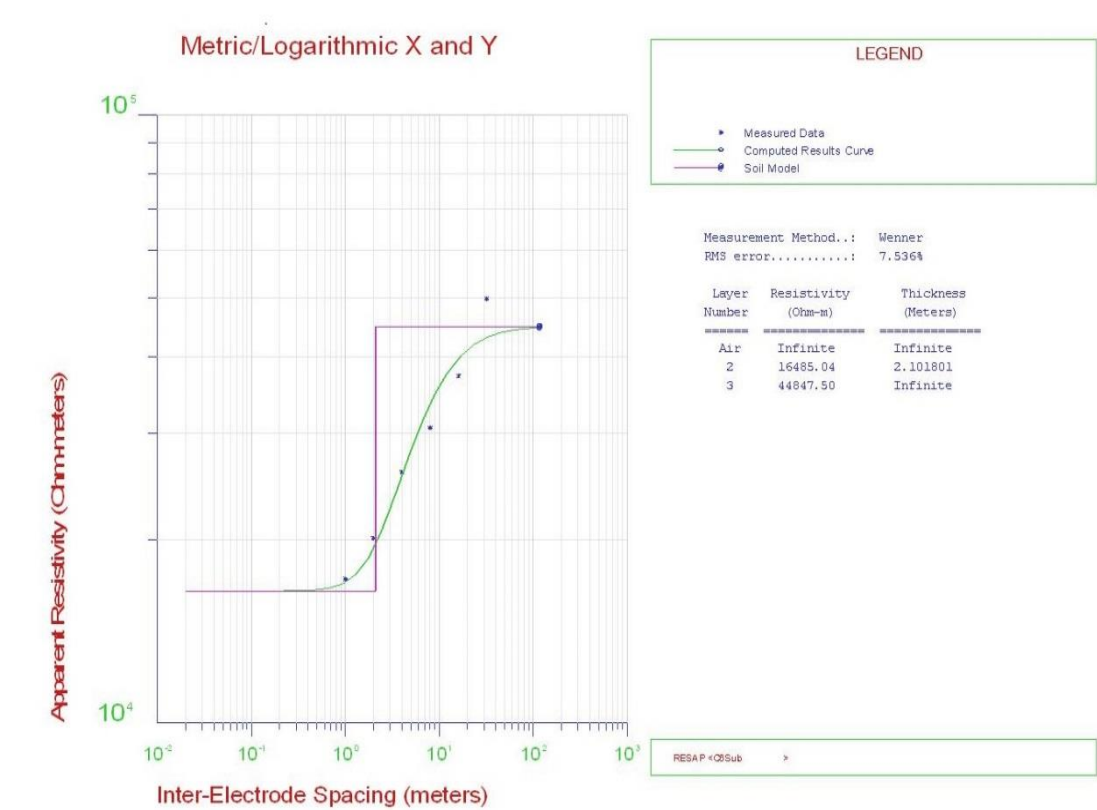
Turbina 14



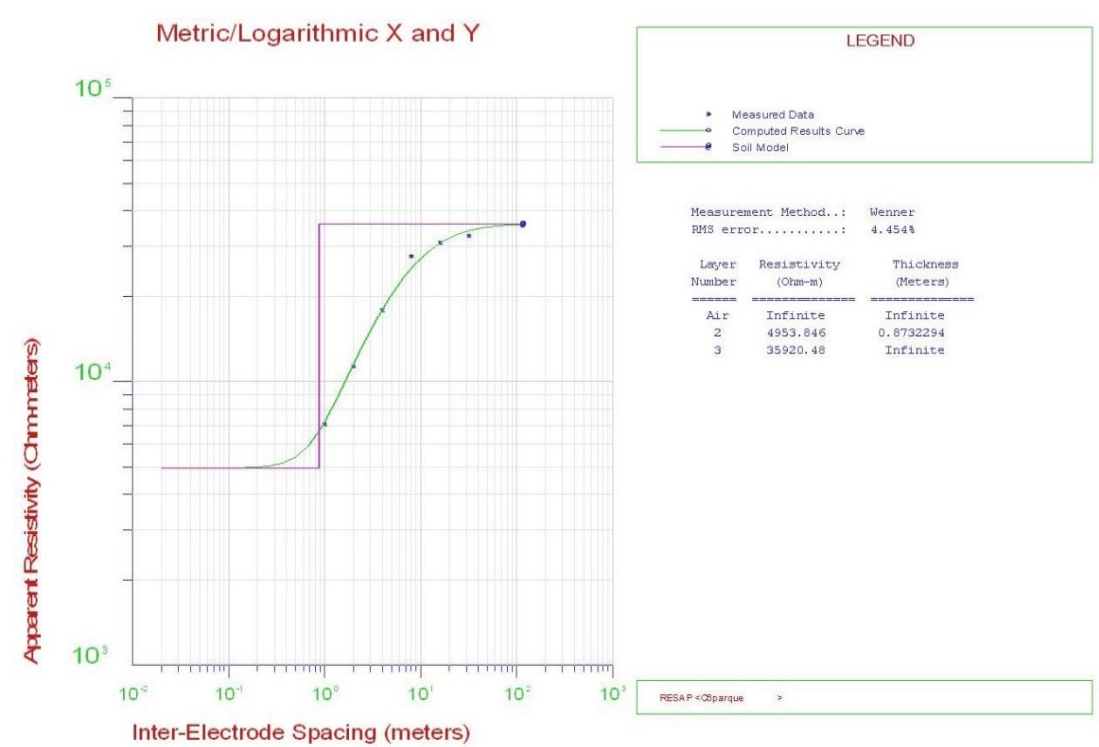
Turbina 15



Estación meteorológica

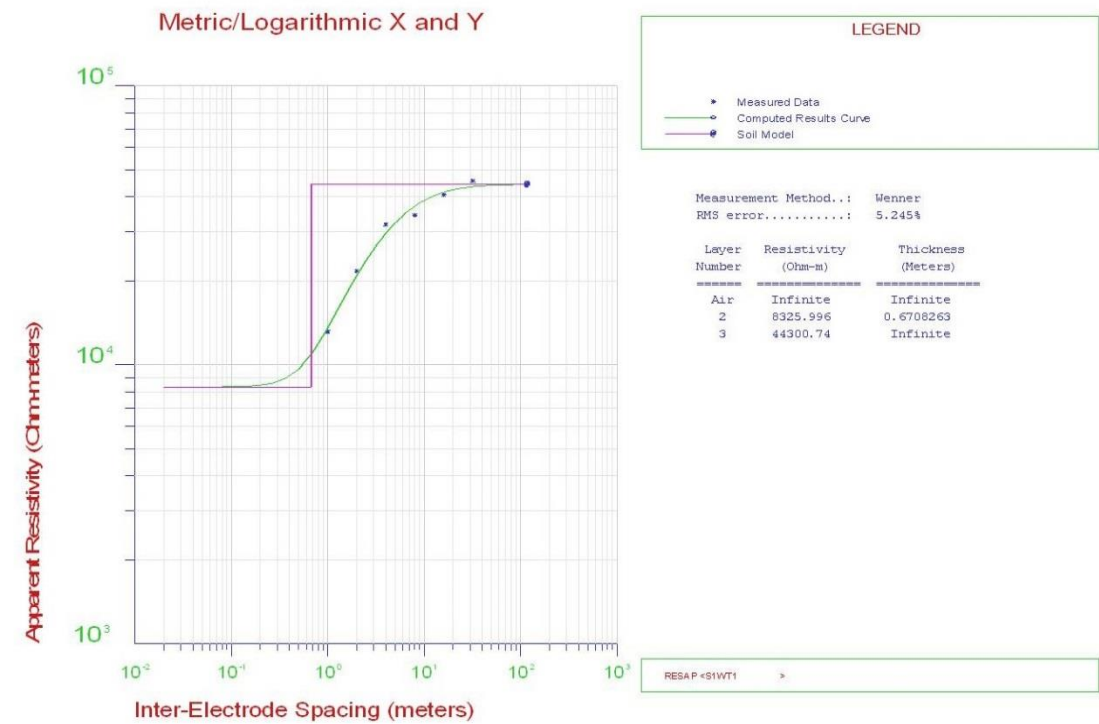


Parque eólico Calango 6

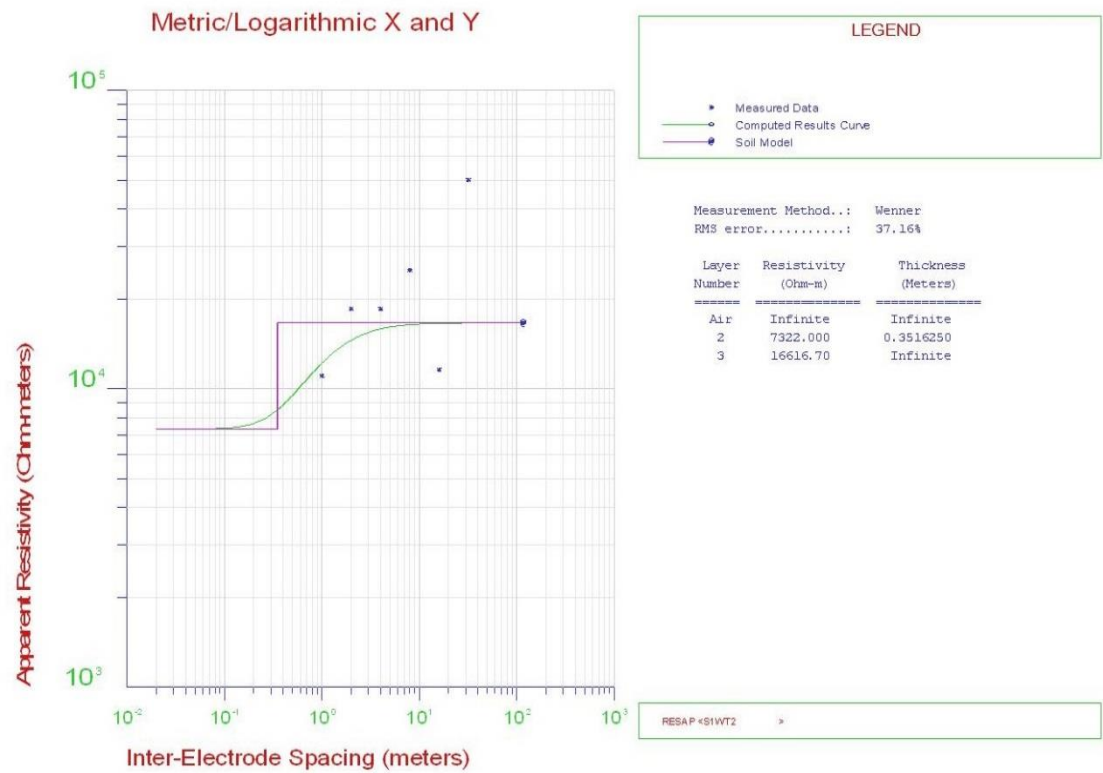


Parque eólico Santana I

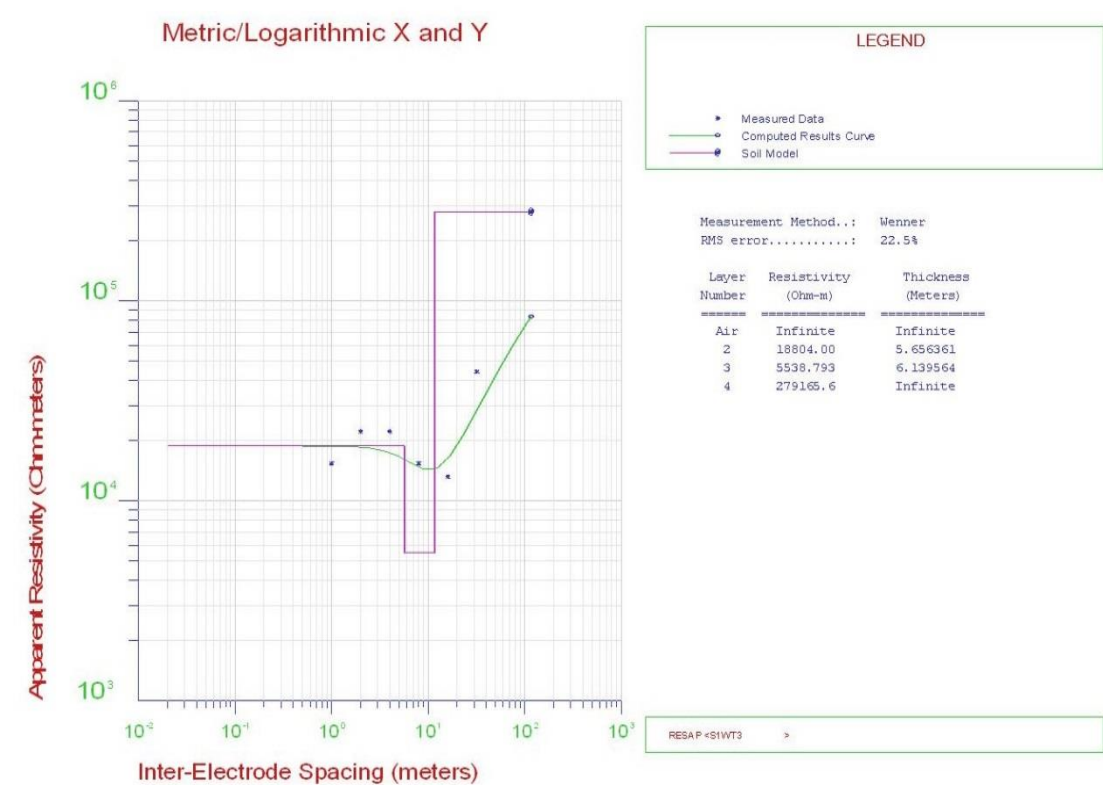
Turbina 1



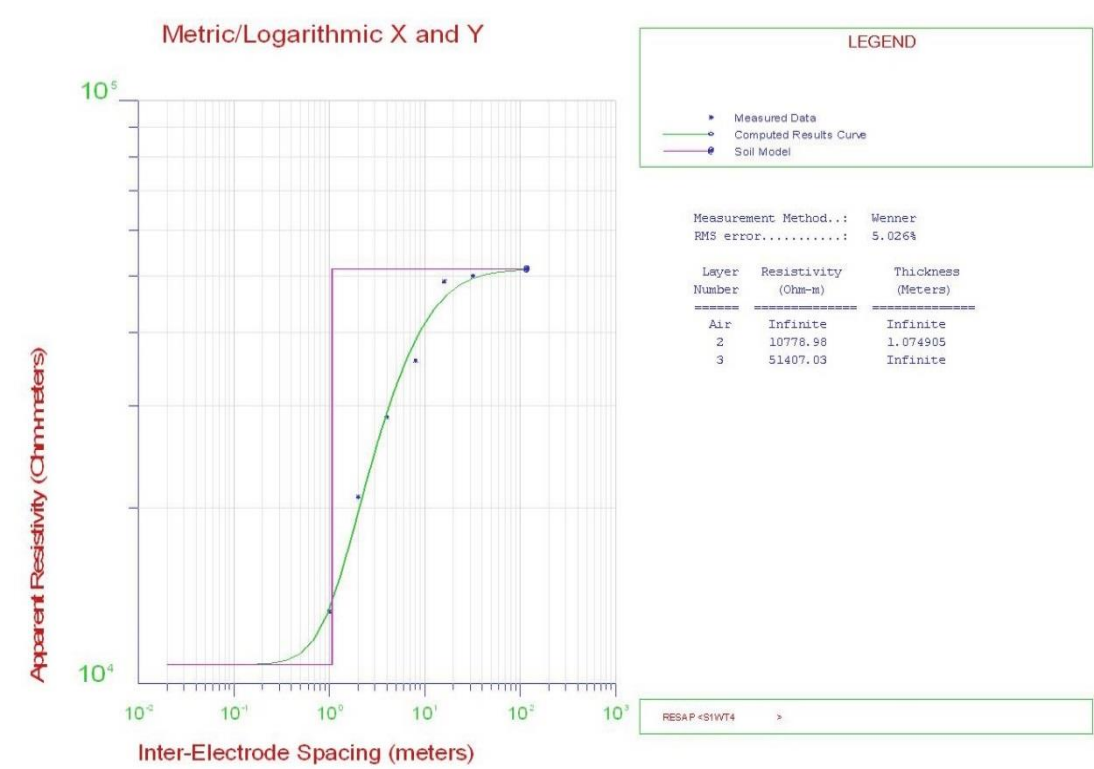
Turbina 2



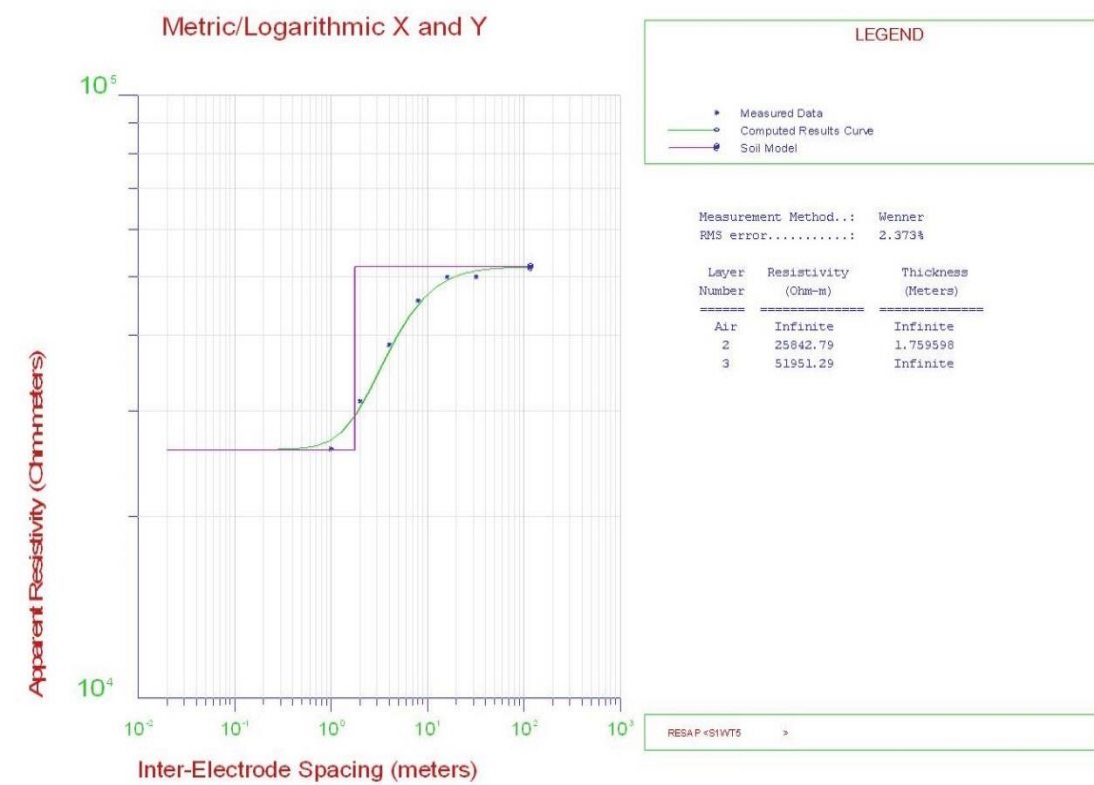
Turbina 3



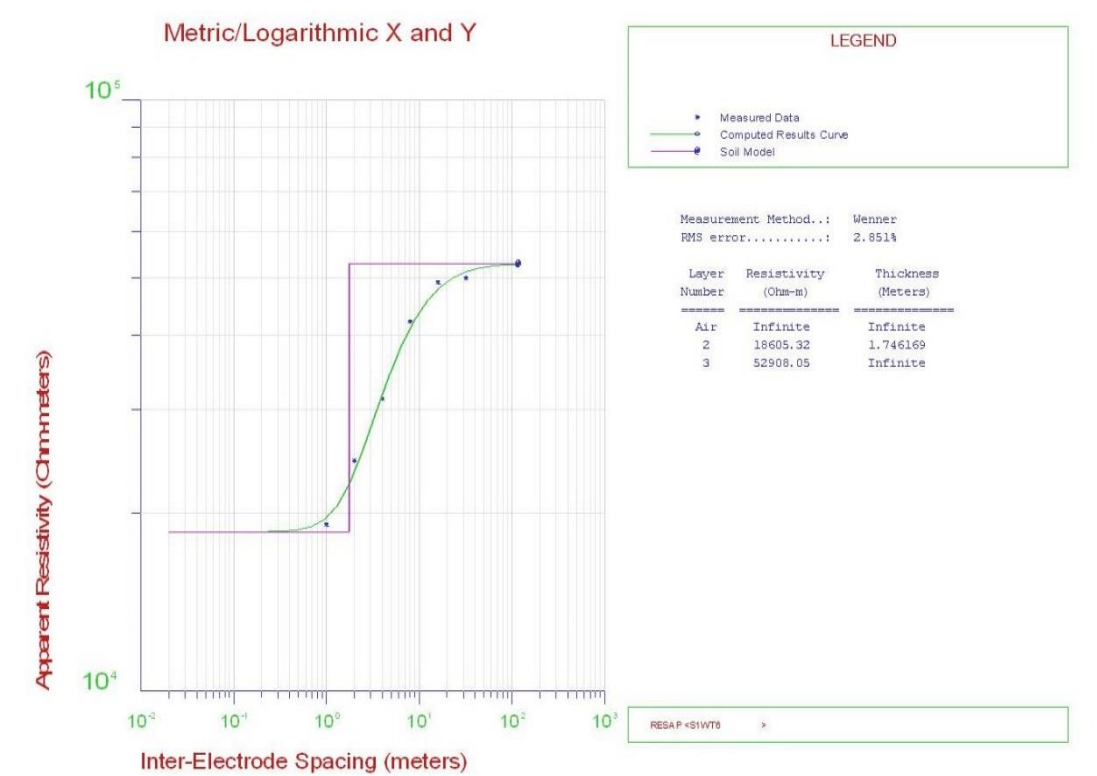
Turbina 4



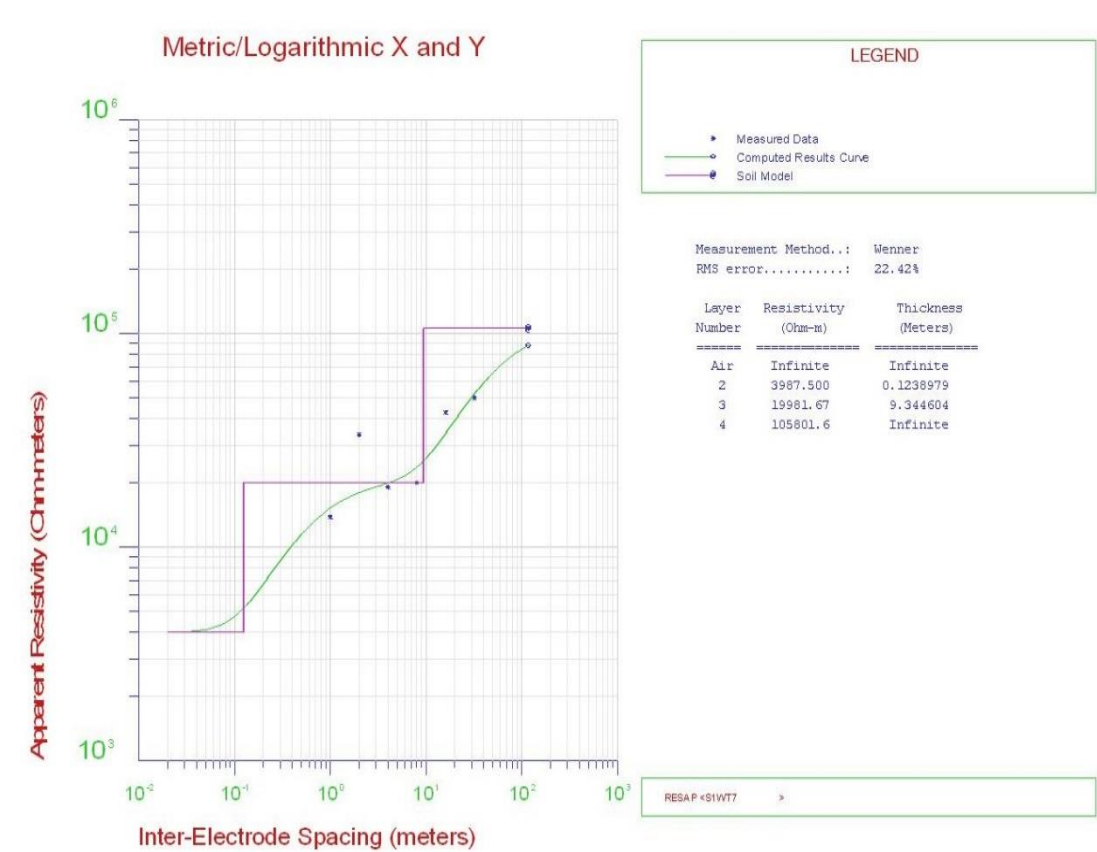
Turbina 5



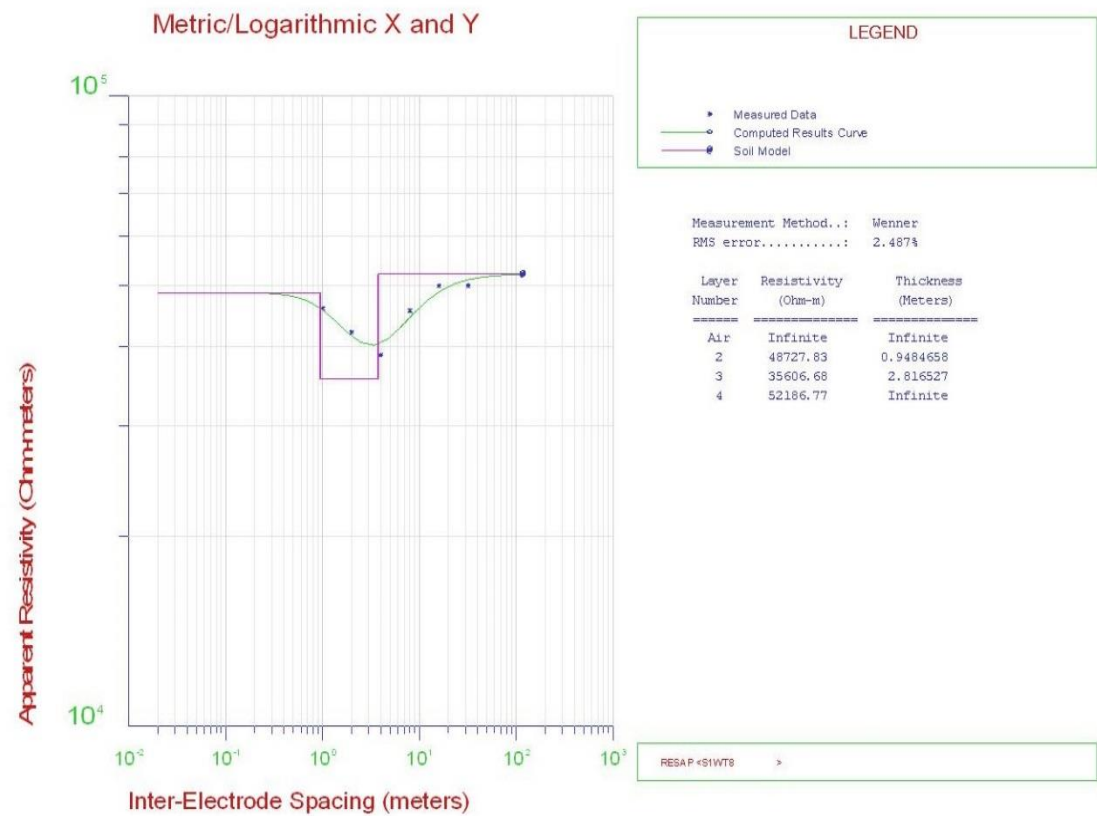
Turbina 6



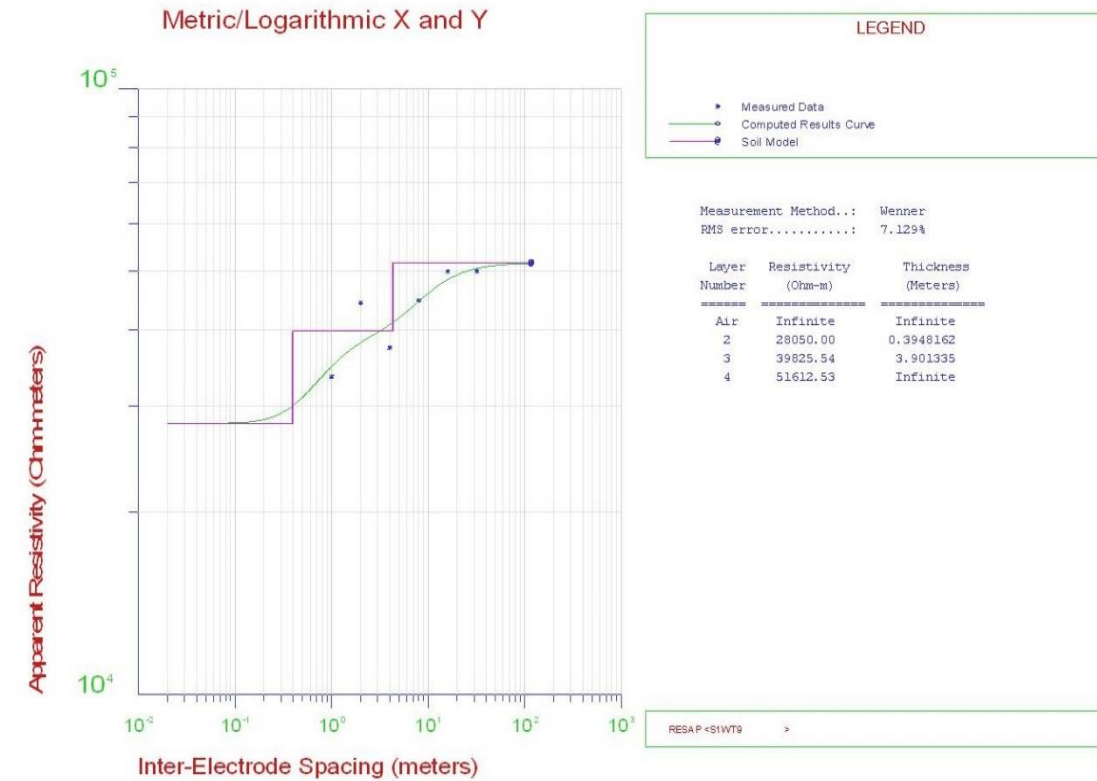
Turbina 7



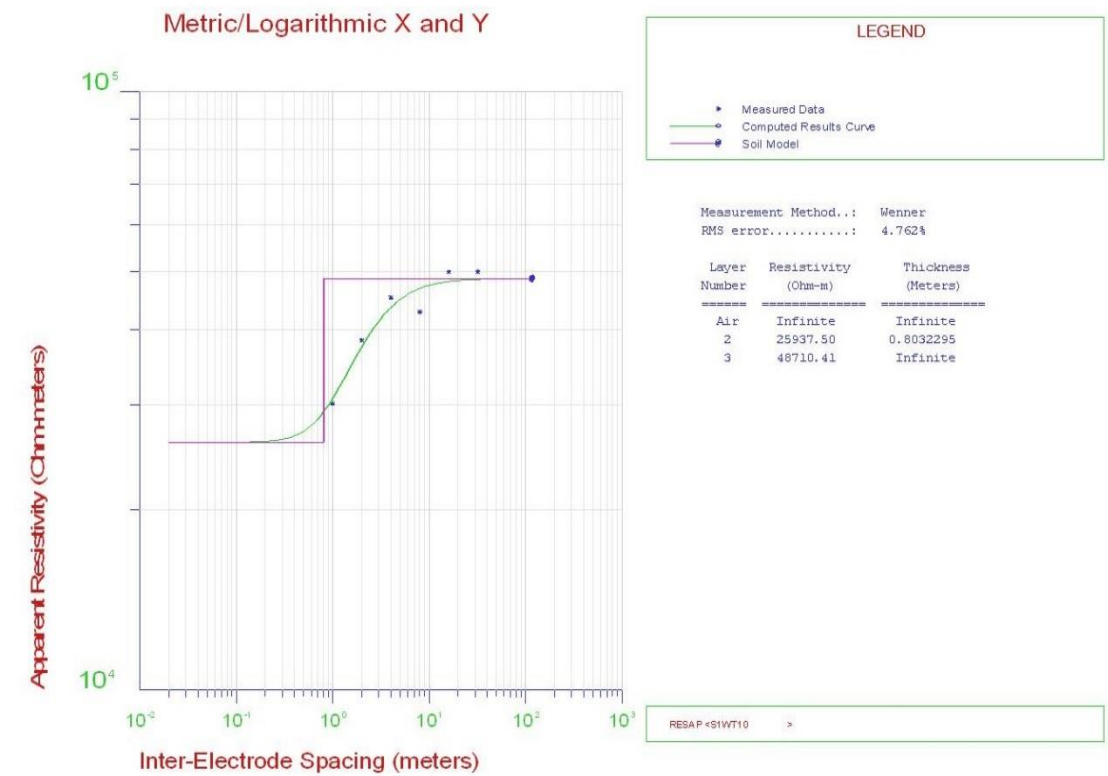
Turbina 8



Turbina 9



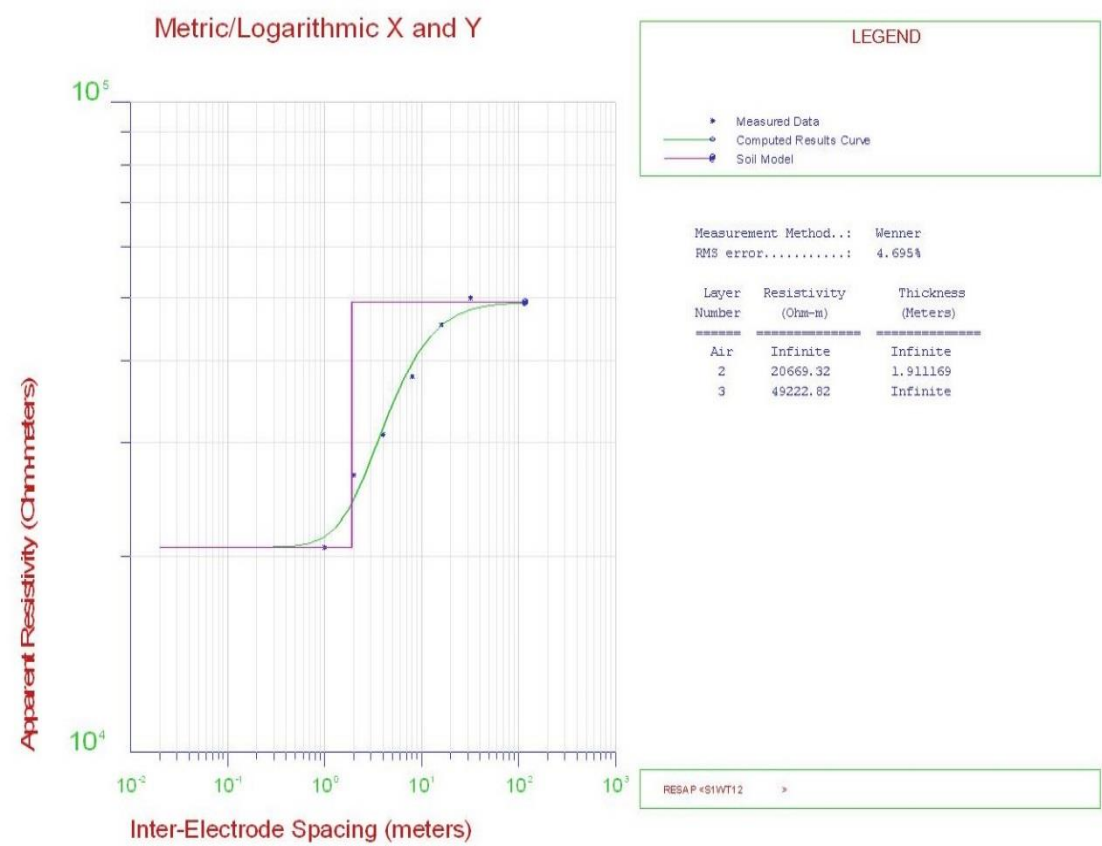
Turbina 10



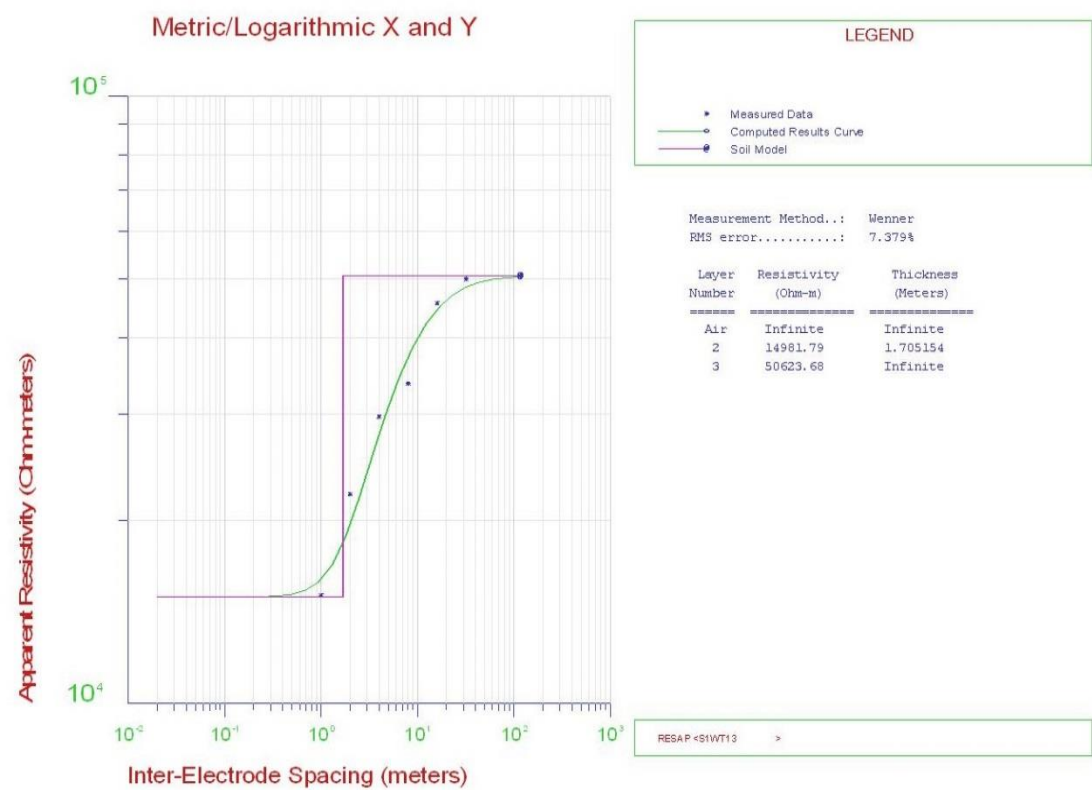
Turbina 11



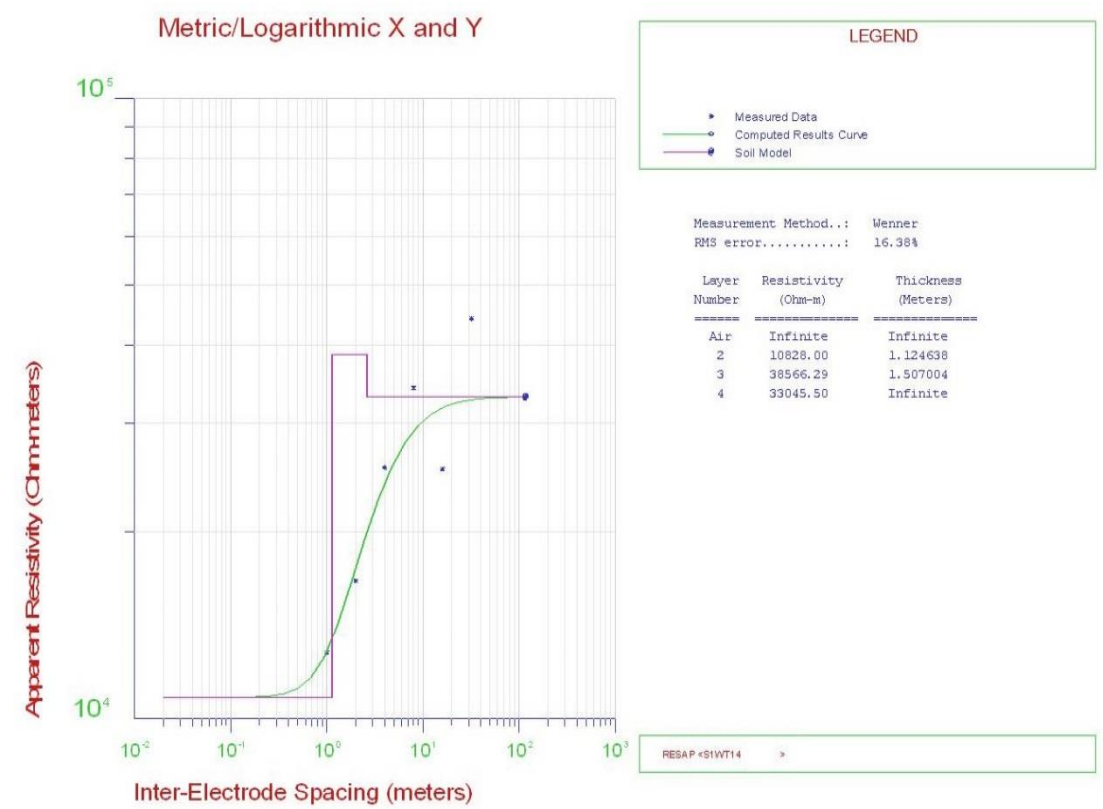
Turbina 12



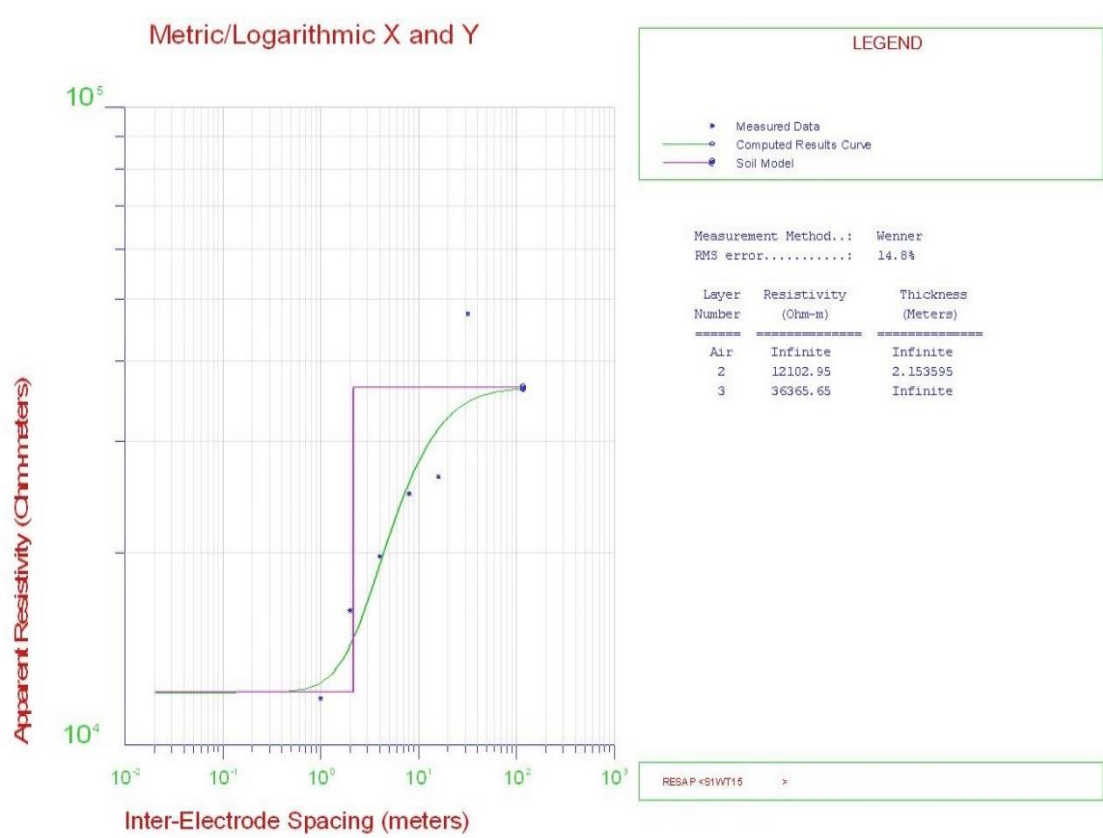
Turbina 13



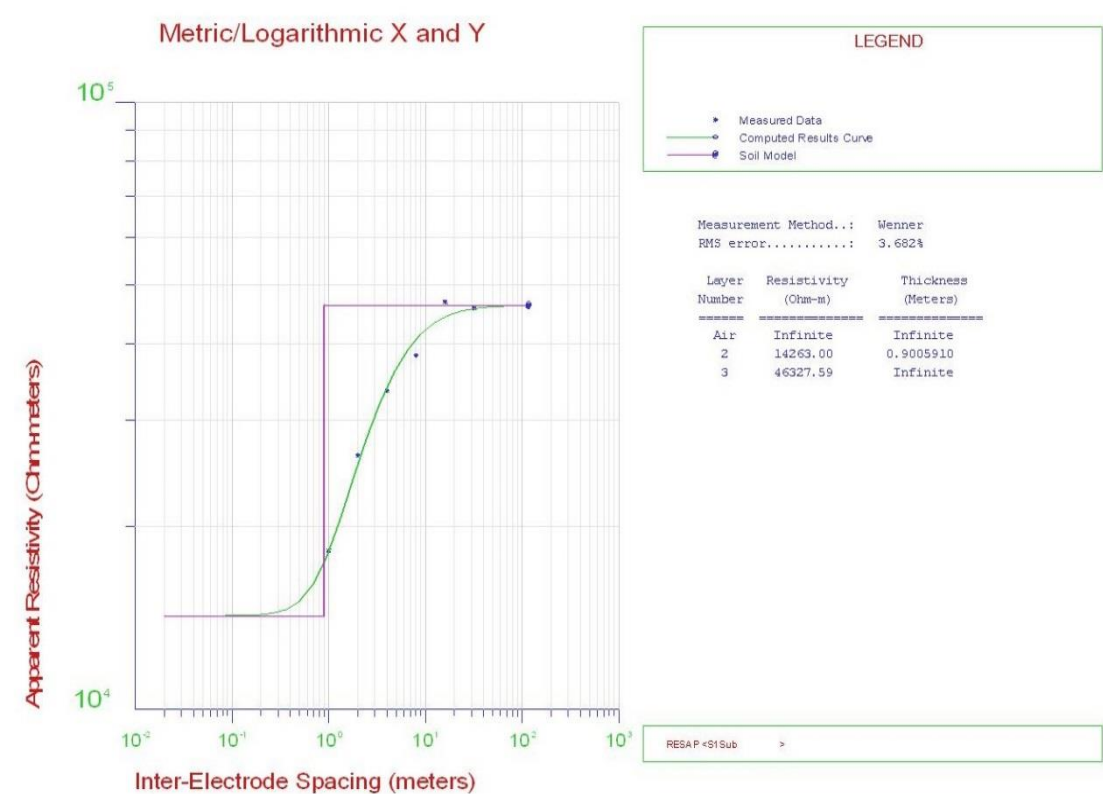
Turbina 14



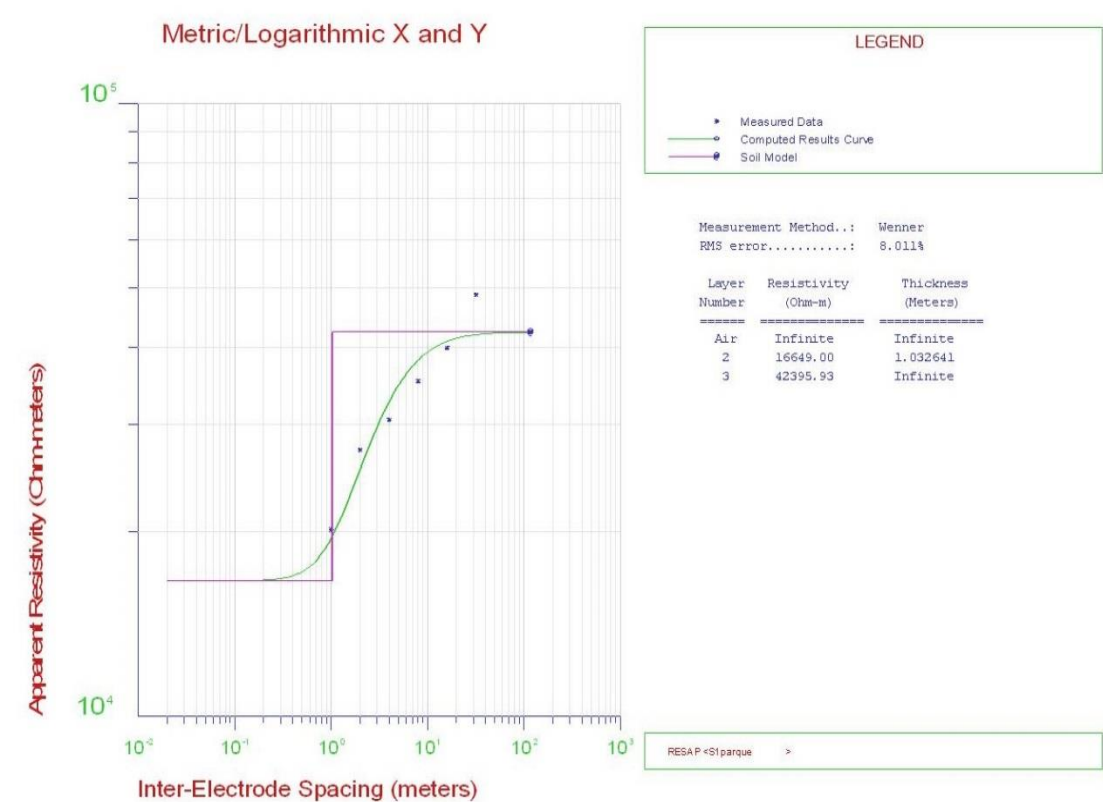
Turbina 15



Estación meteorológica

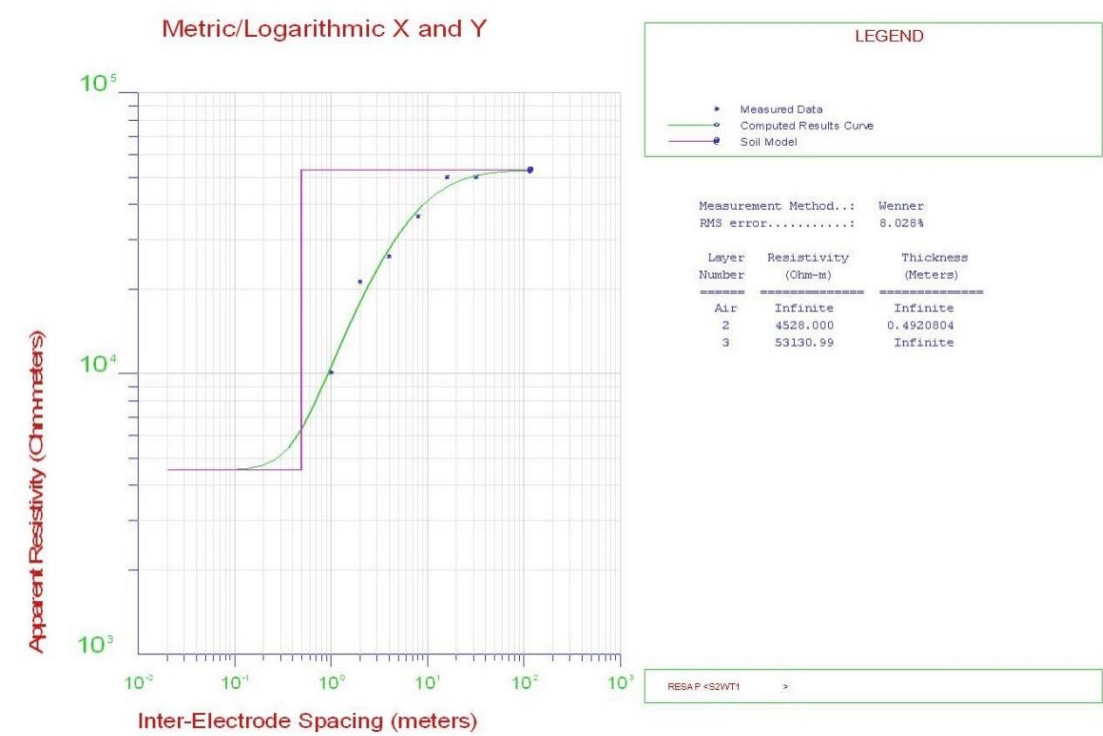


Parque eólico Santana I

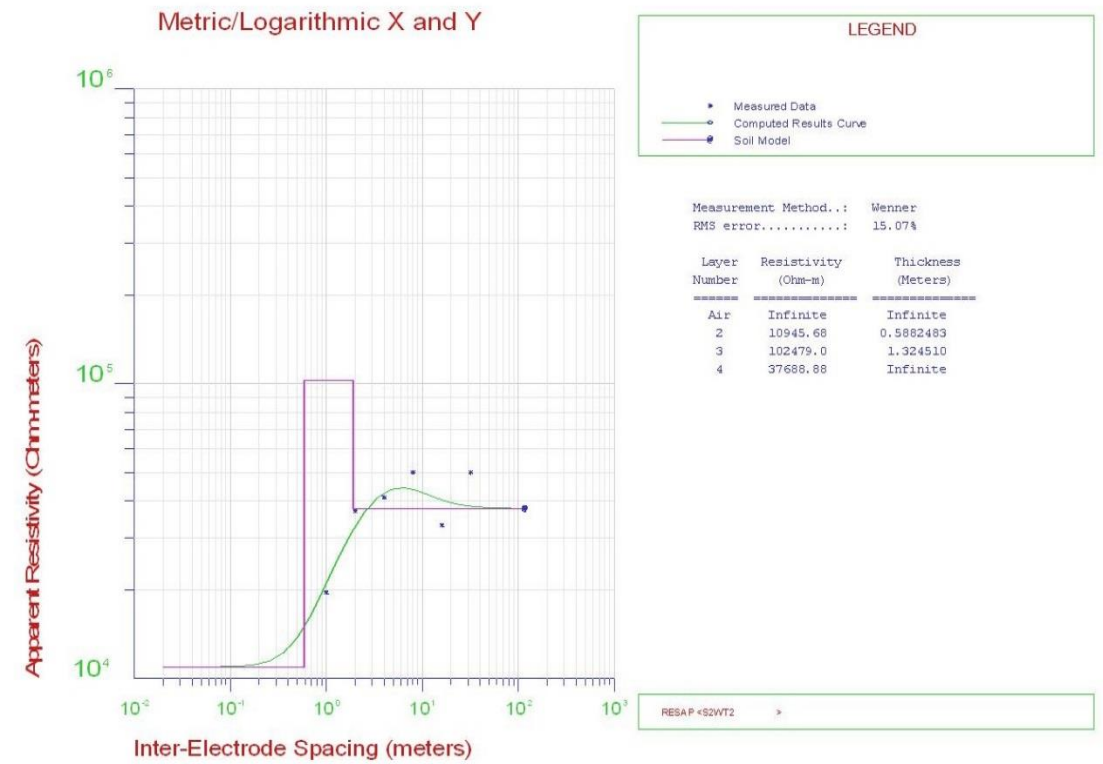


Parque eólico Santana II

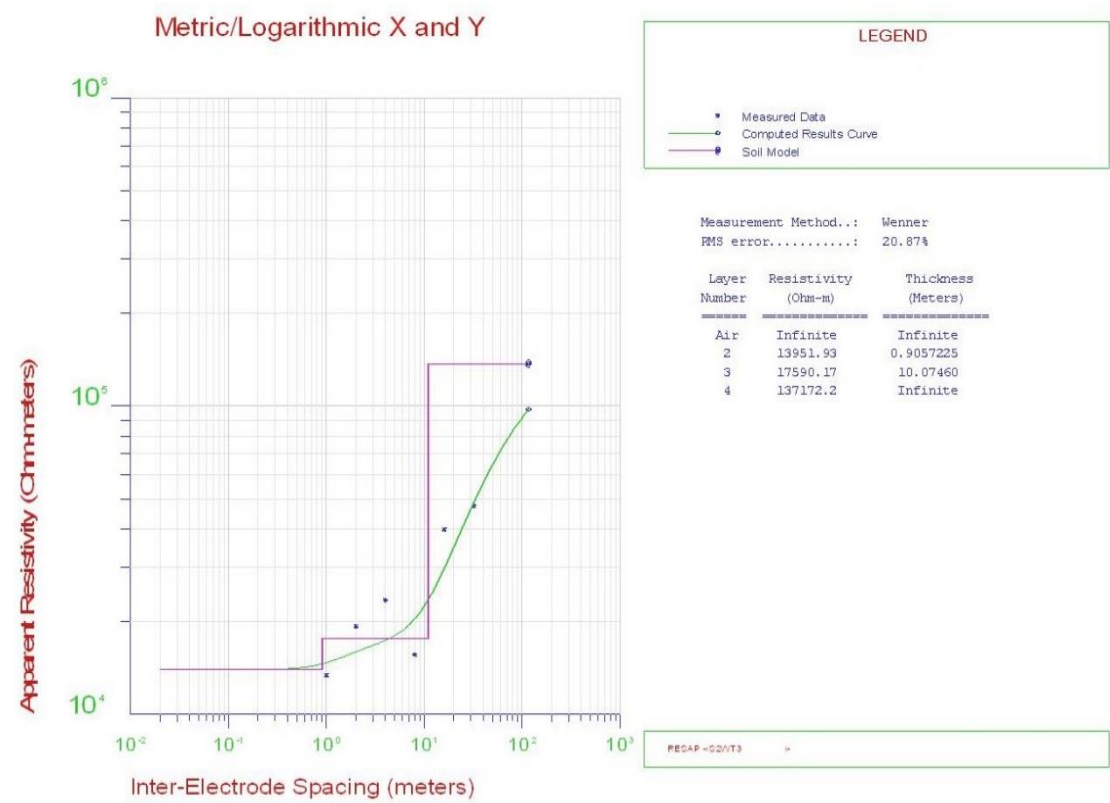
Turbina 1



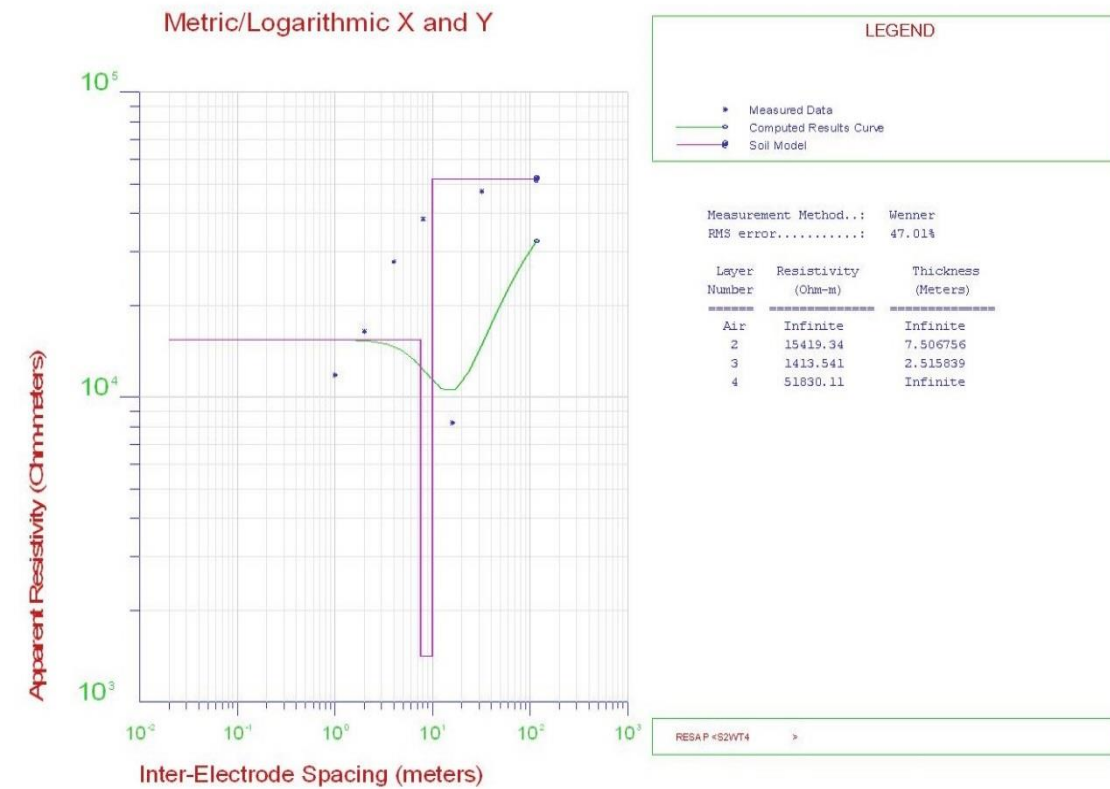
Turbina 2



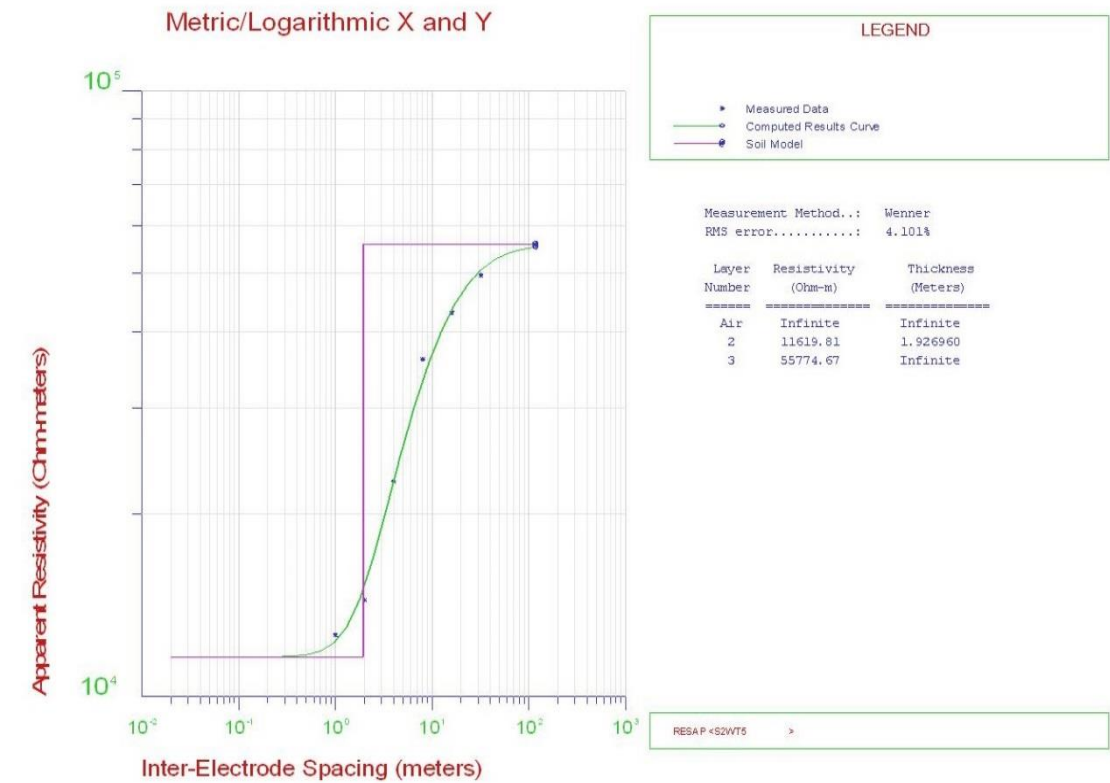
Turbina 3



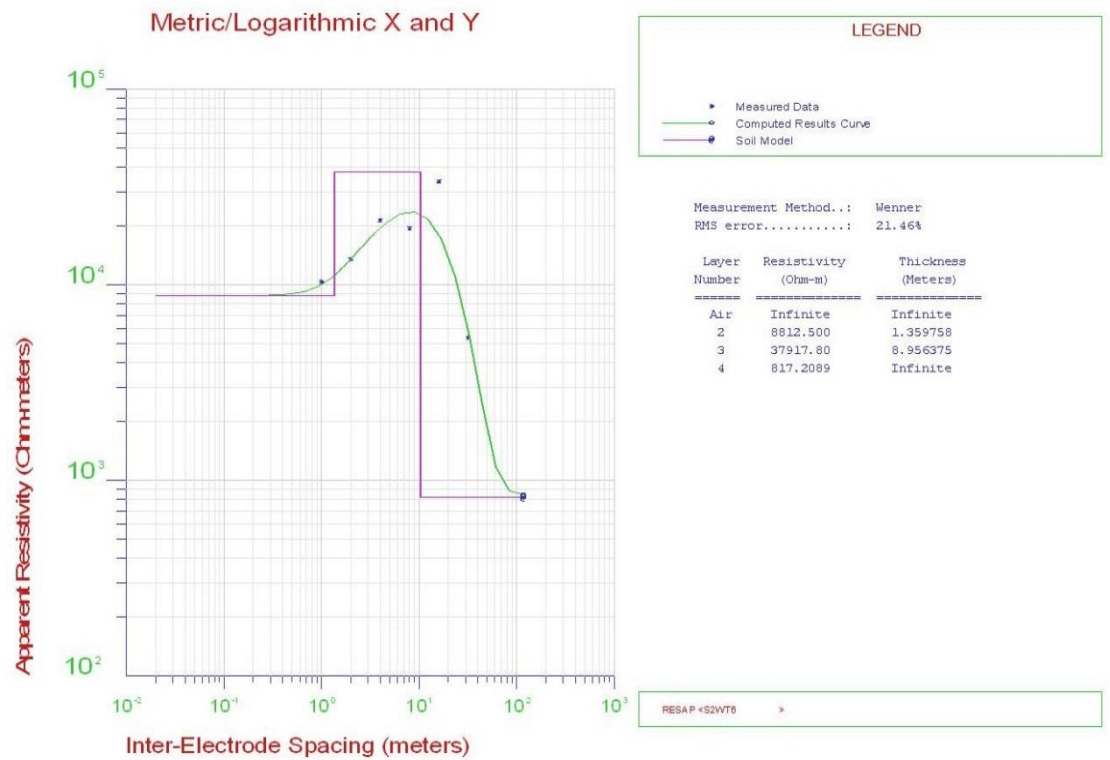
Turbina 4



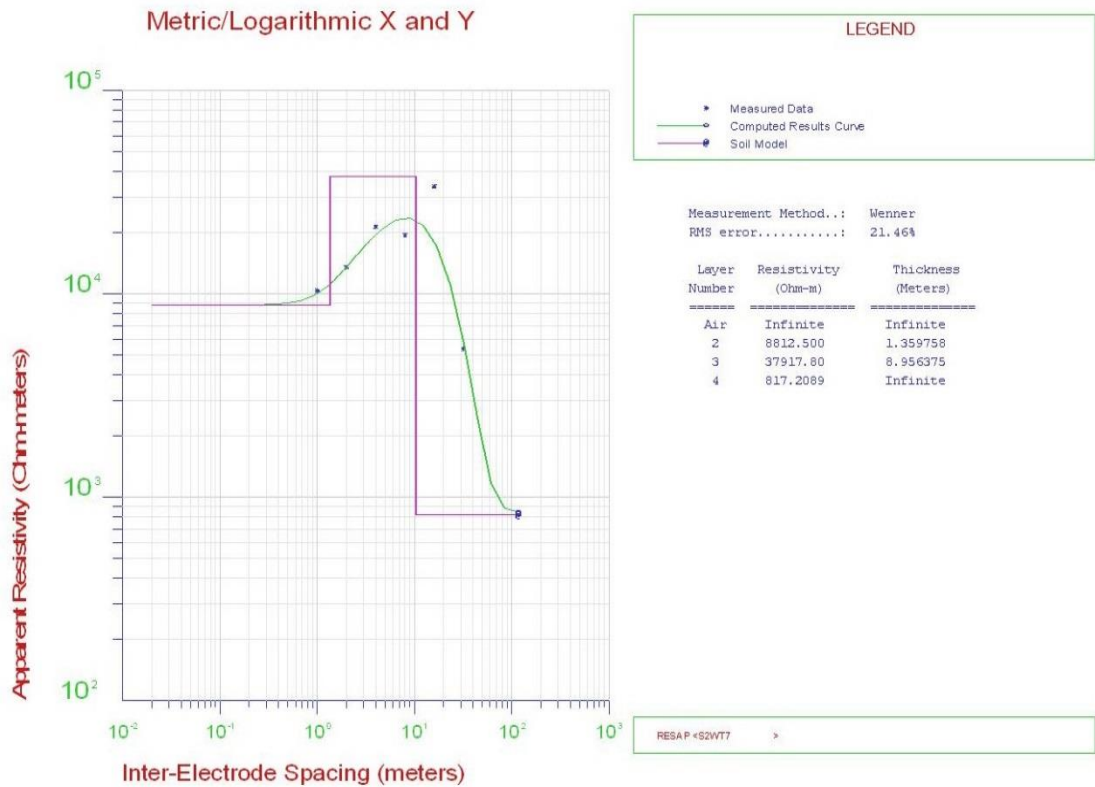
Turbina 5



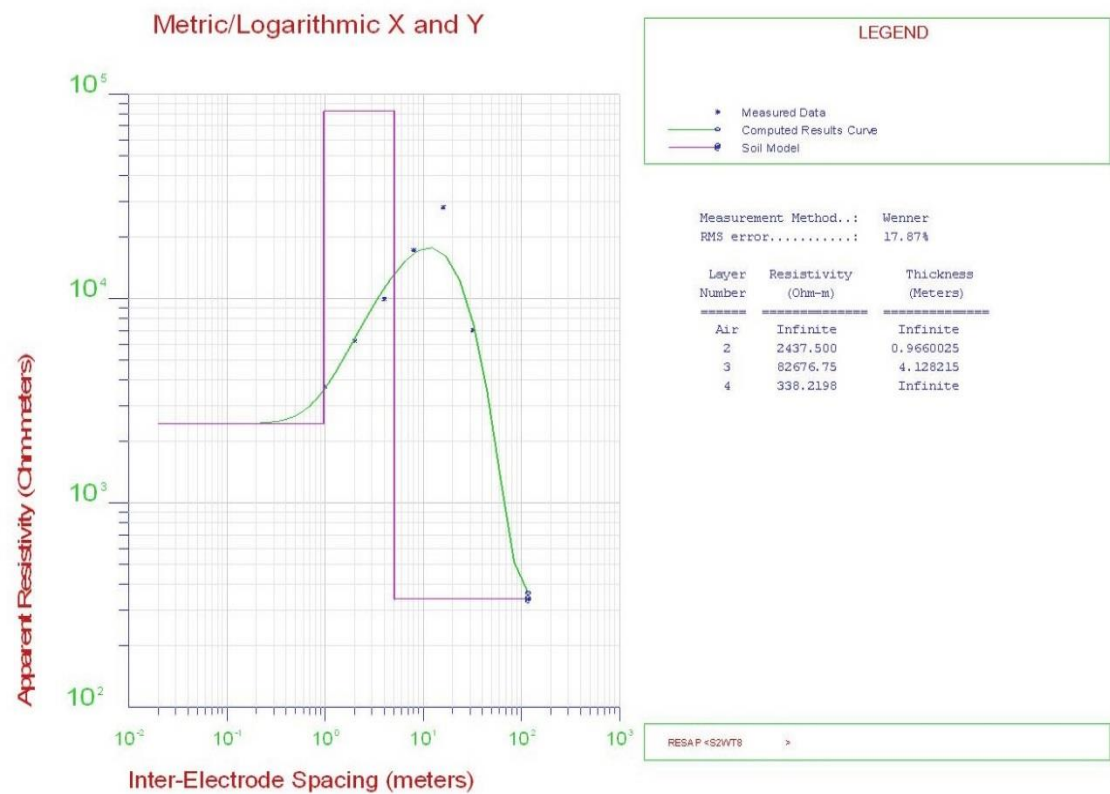
Turbina 6



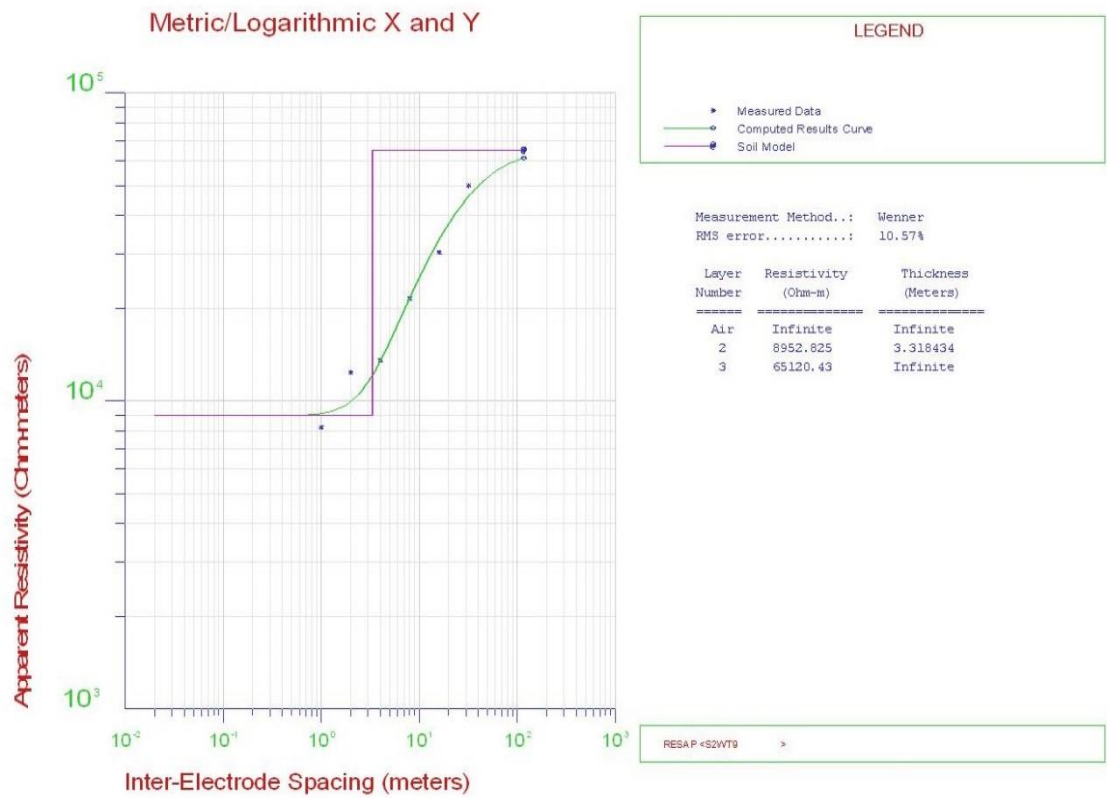
Turbina 7



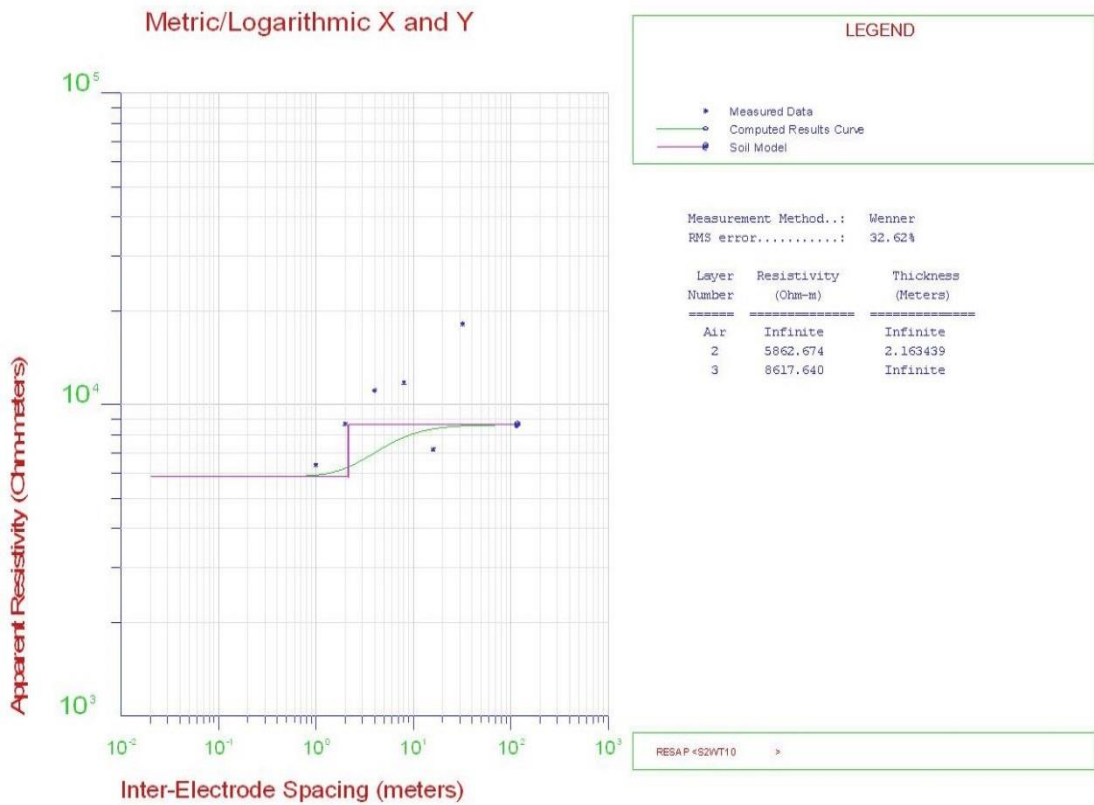
Turbina 8



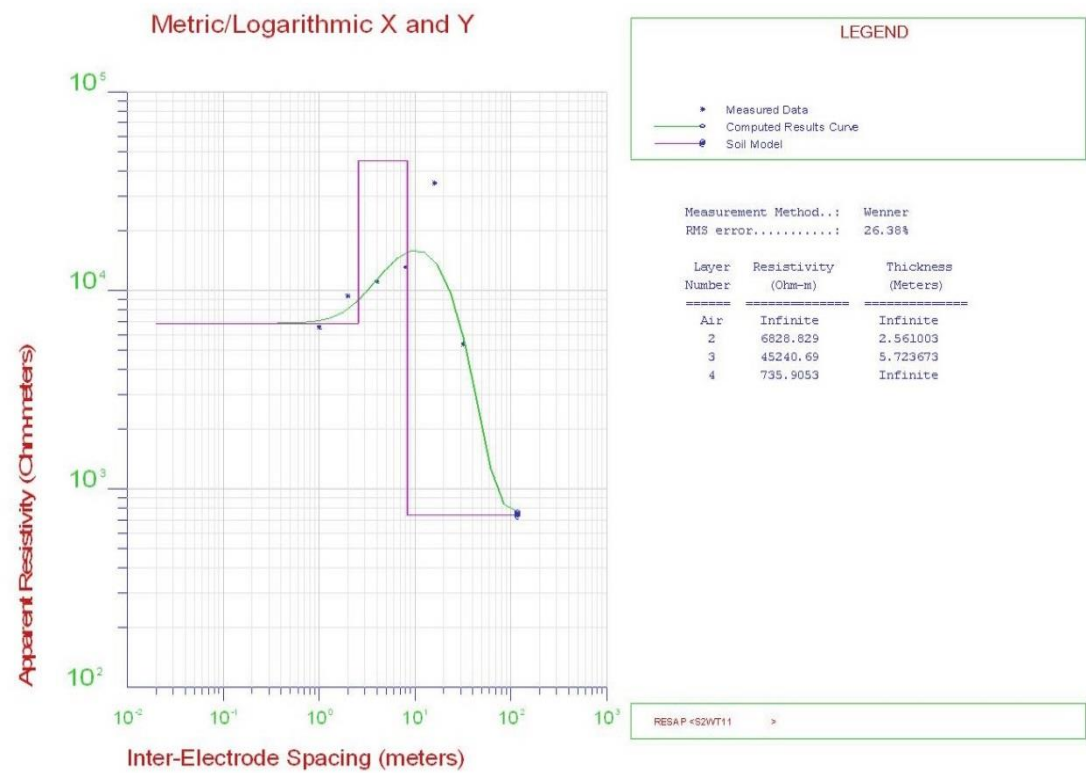
Turbina 9



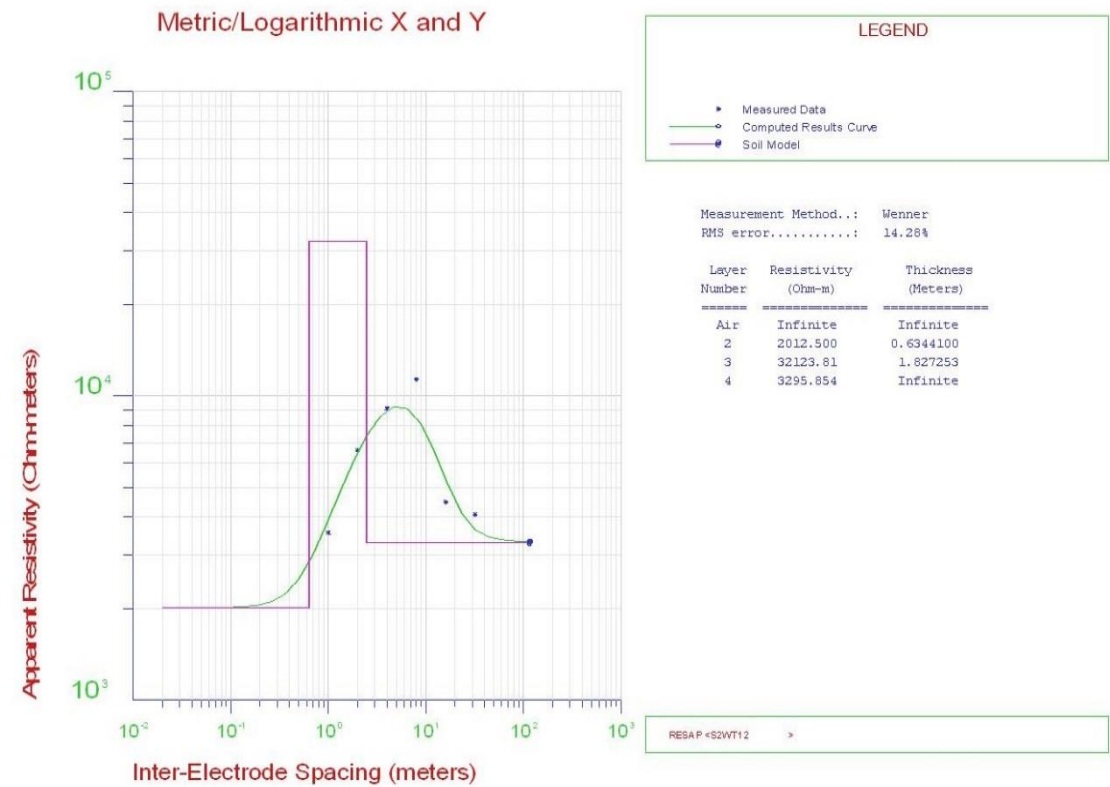
Turbina 10



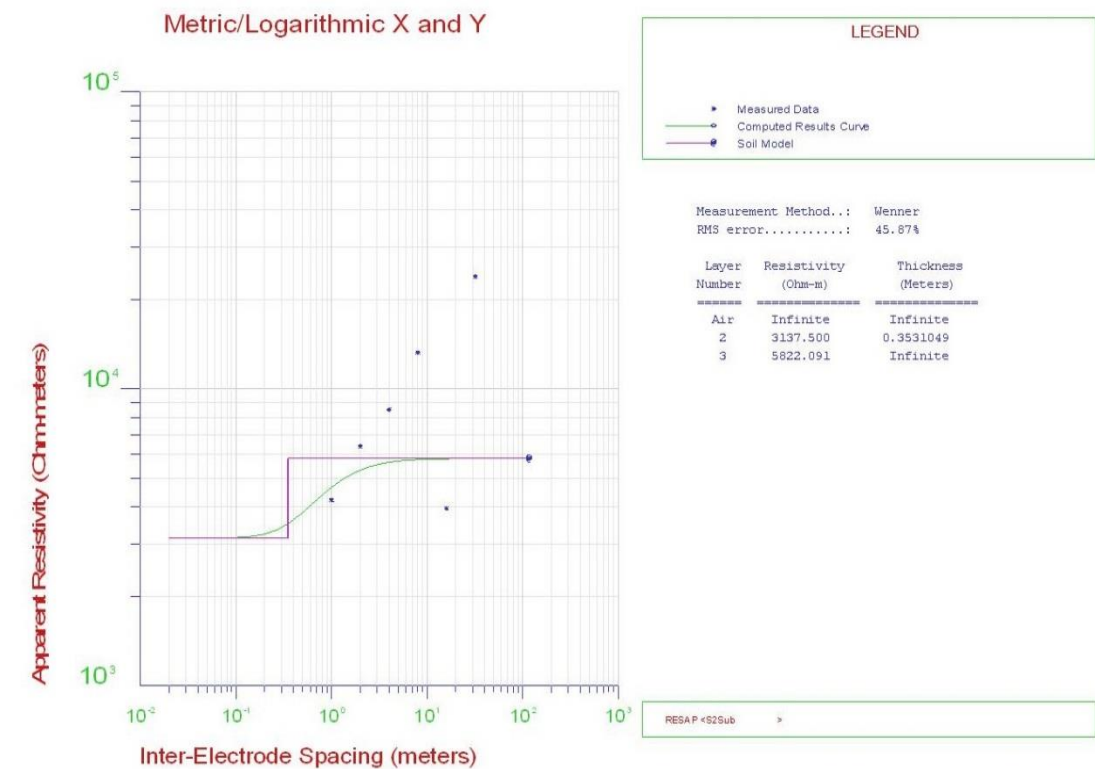
Turbina 11



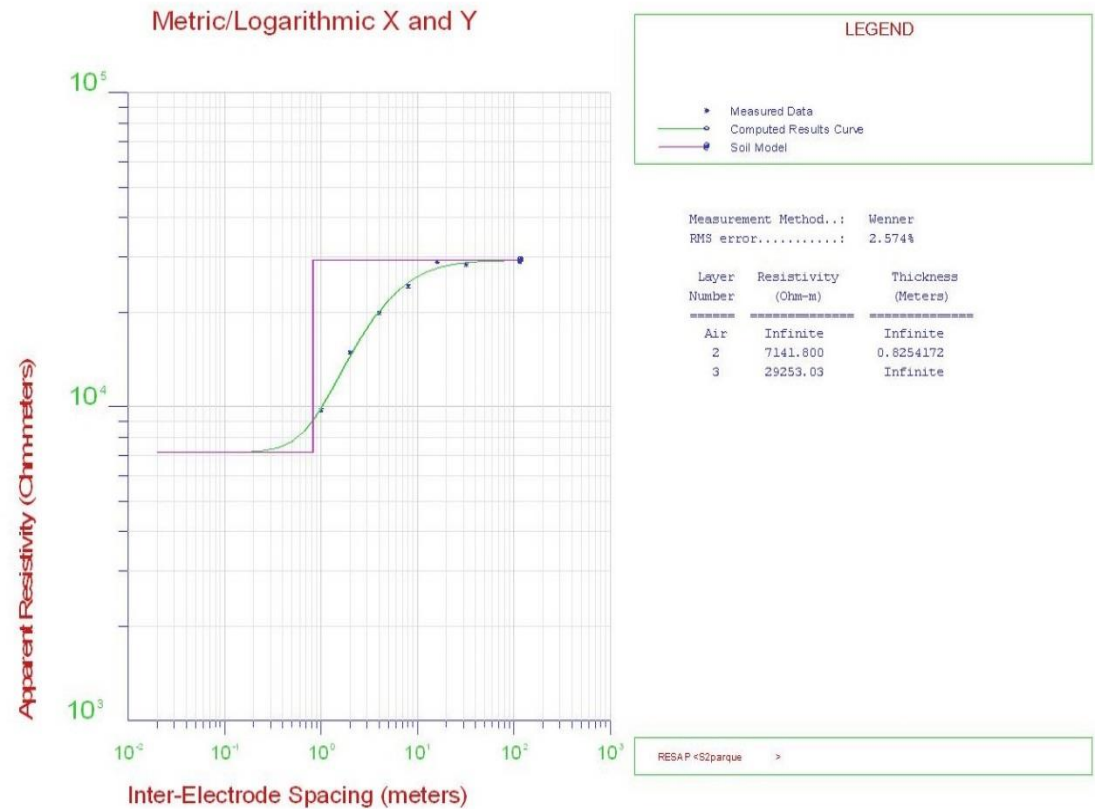
Turbina 12



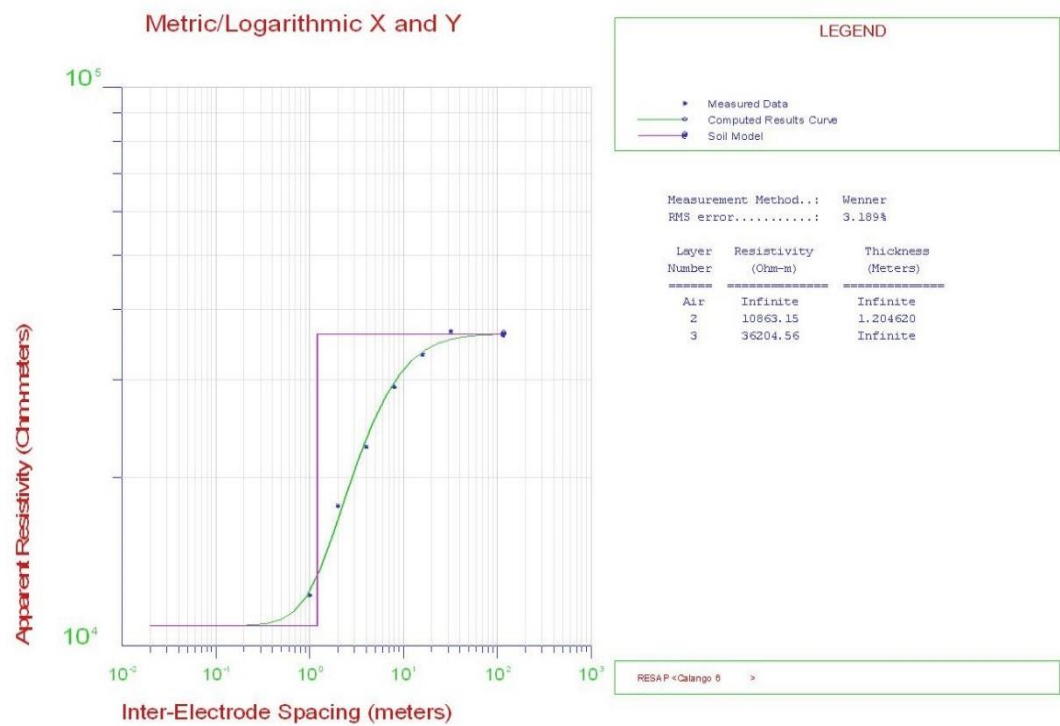
Estación meteorológica



Parque eólico Santana II



Conjunto de parques eólicos (Calango 6, Santana I y Santana II)

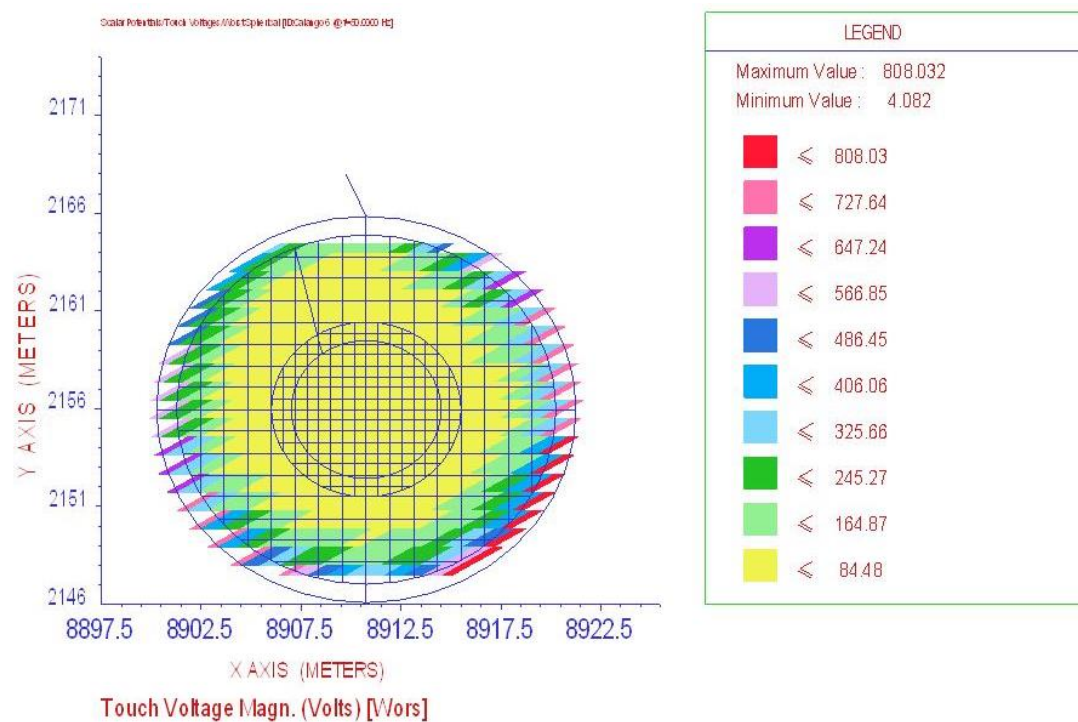
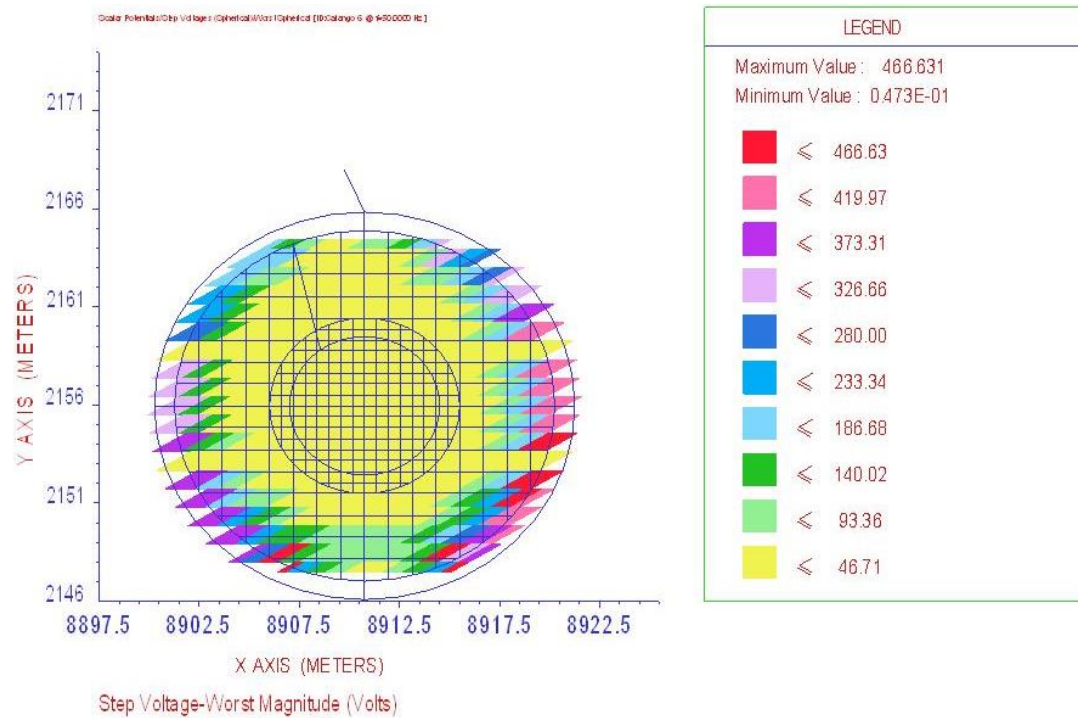


ANEXO C

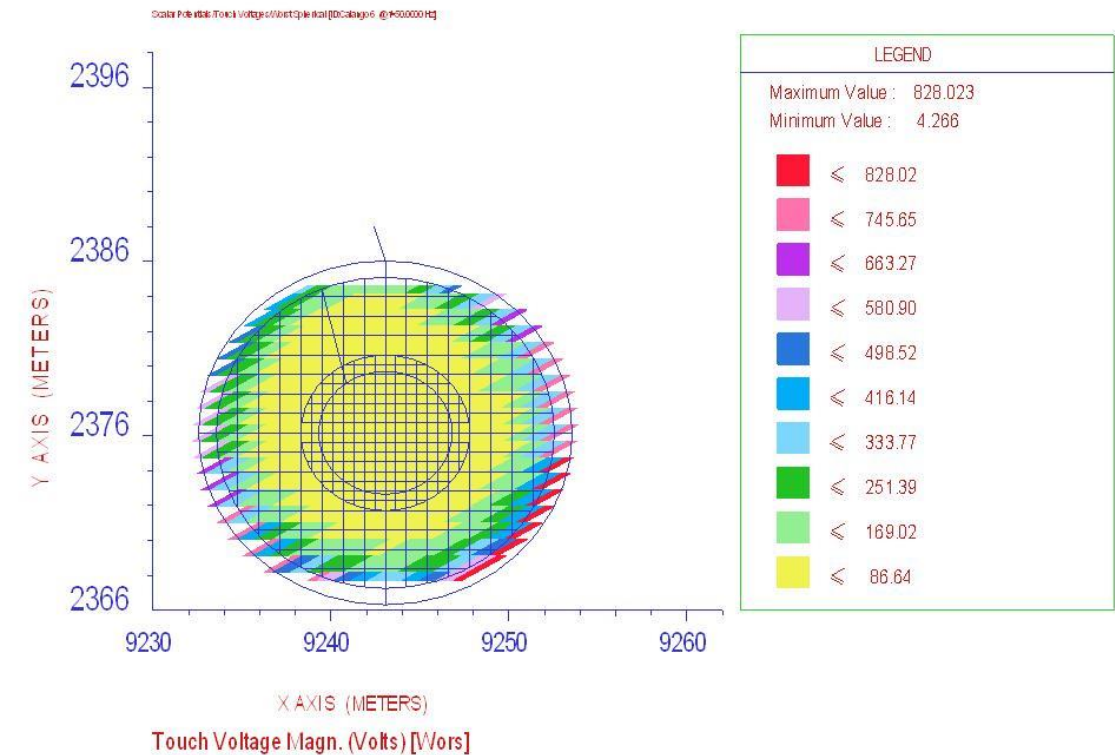
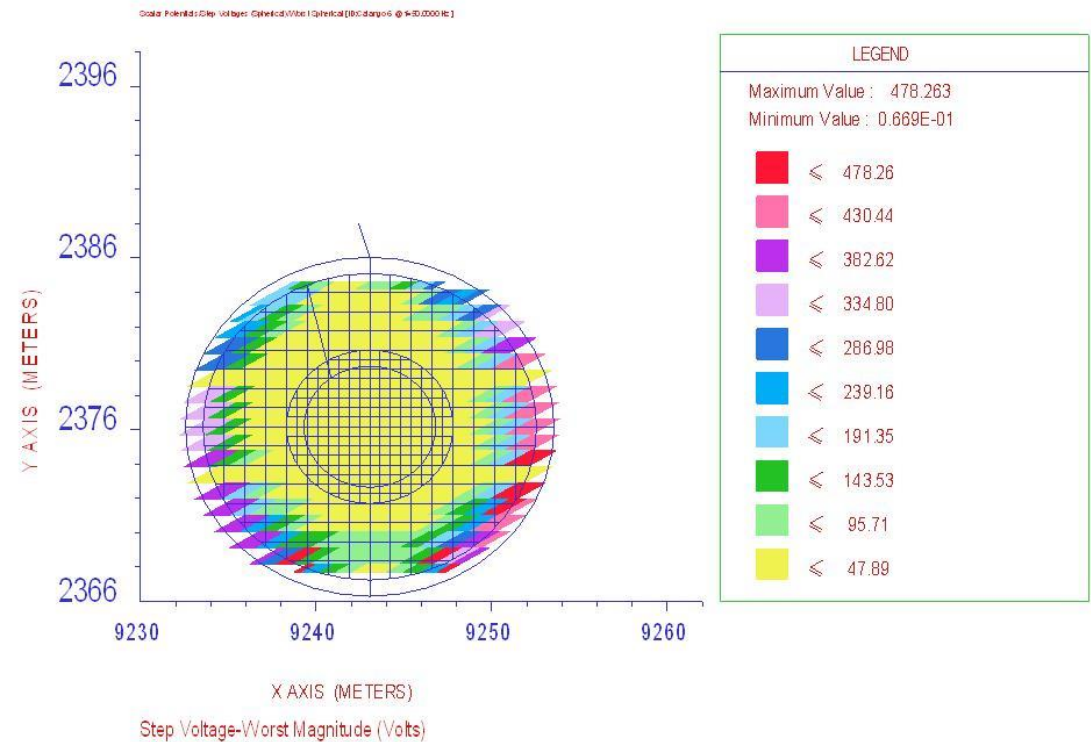
Tensiones de paso y de contacto de los parques eólicos Calango 6, Santana I y Santana II

Parque eólico Calango 6

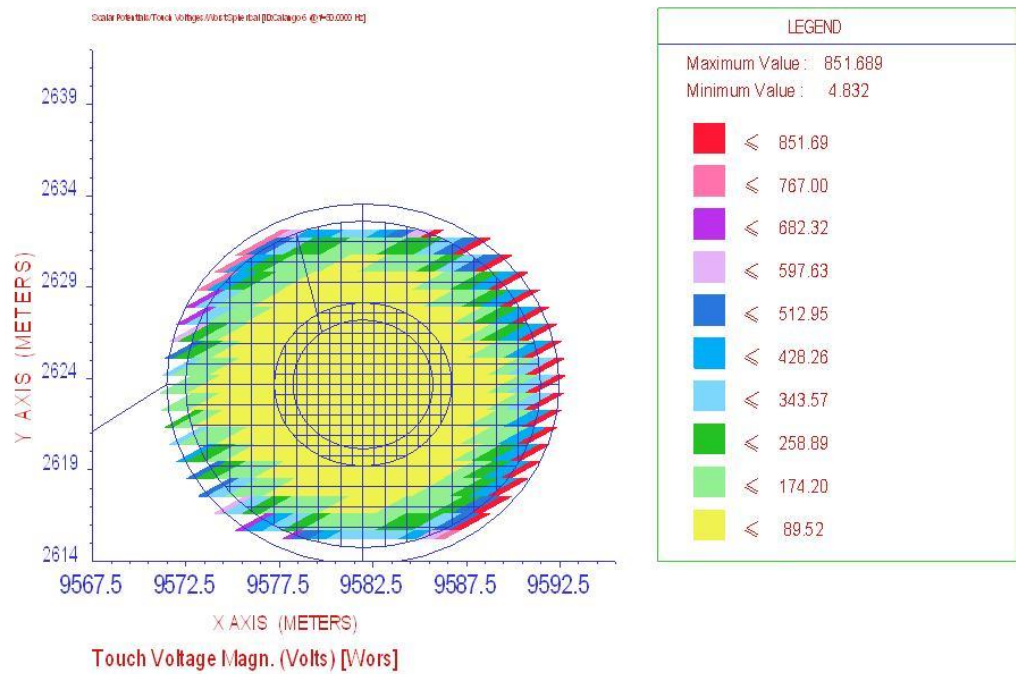
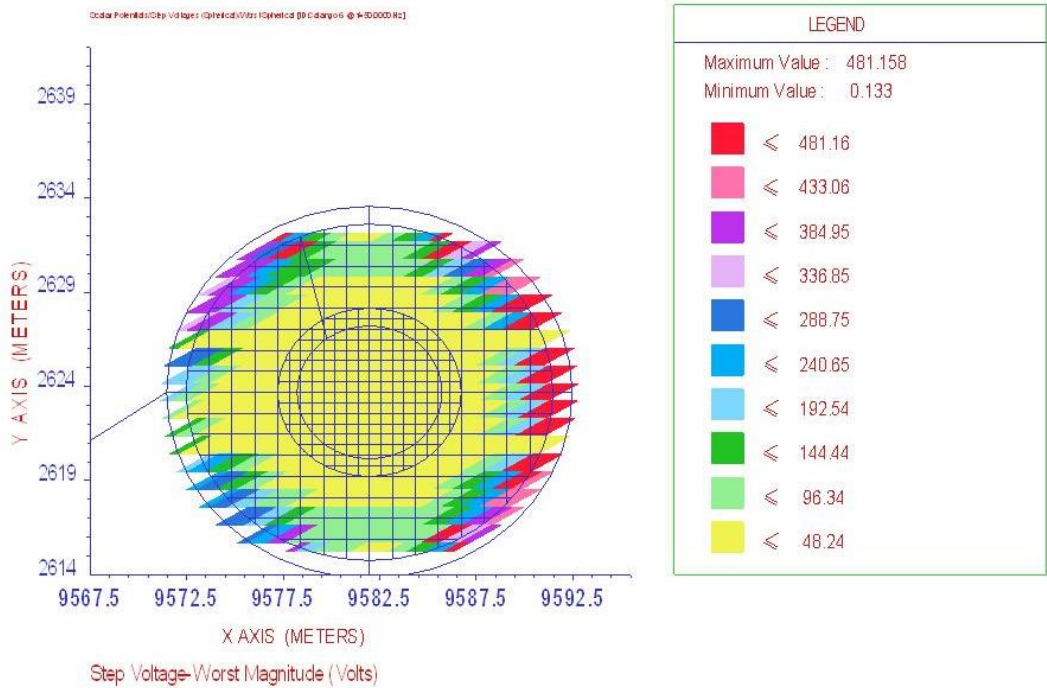
Turbina 1



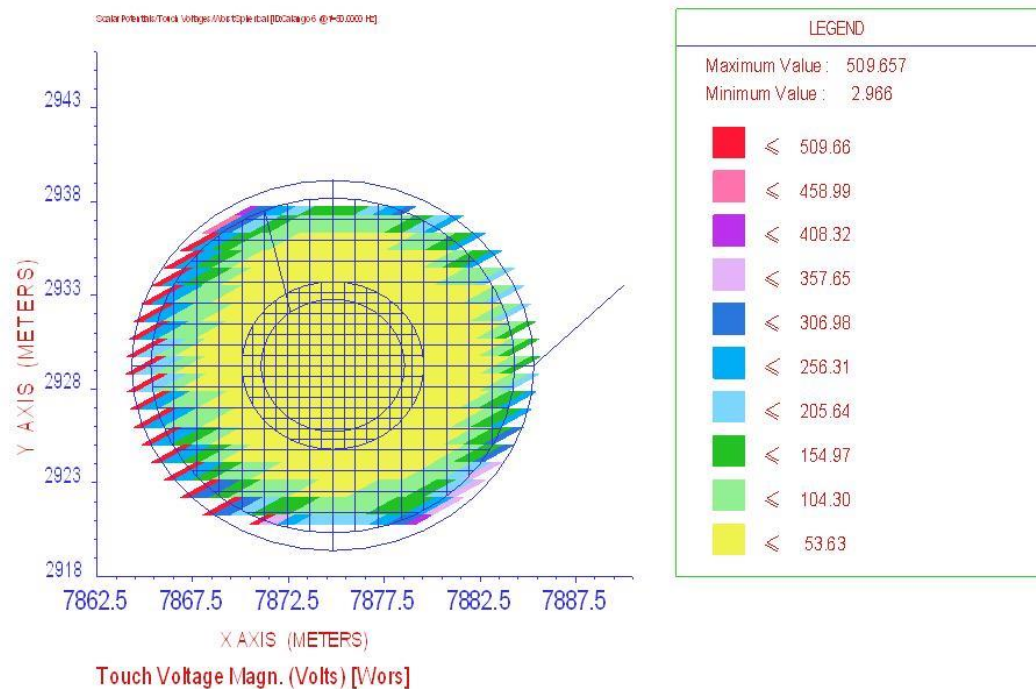
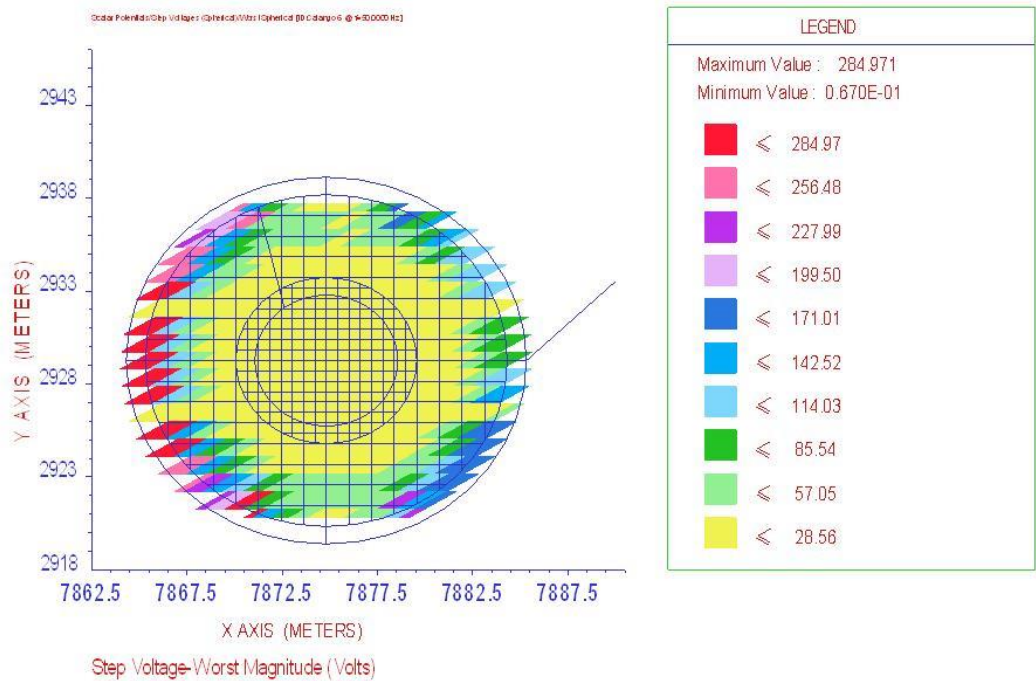
Turbina 2



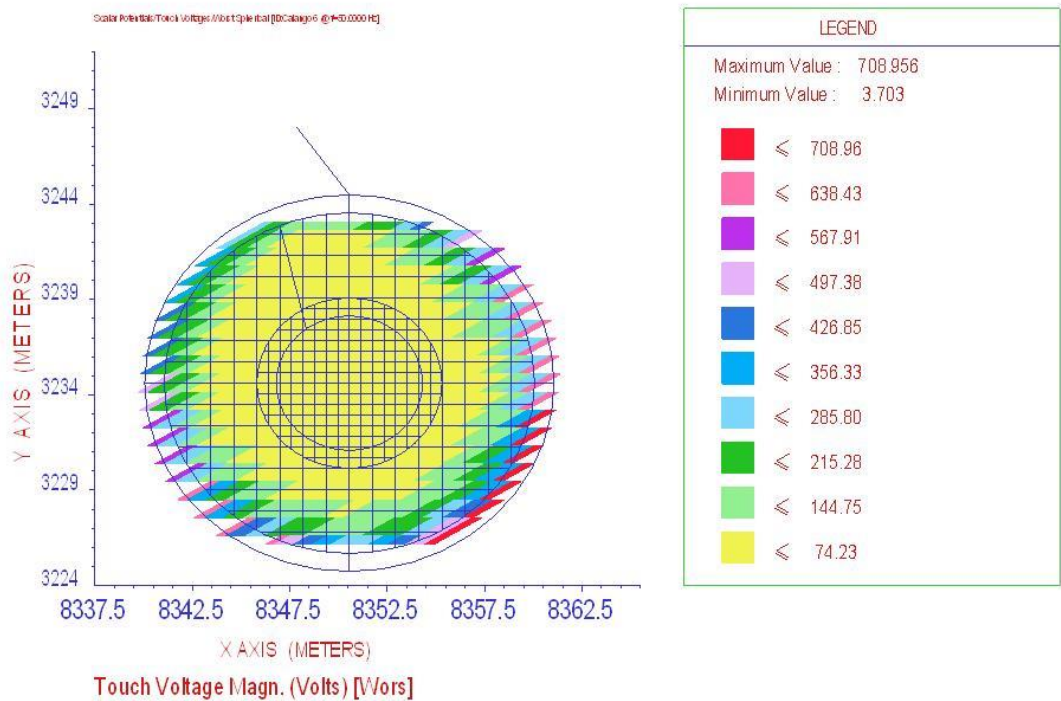
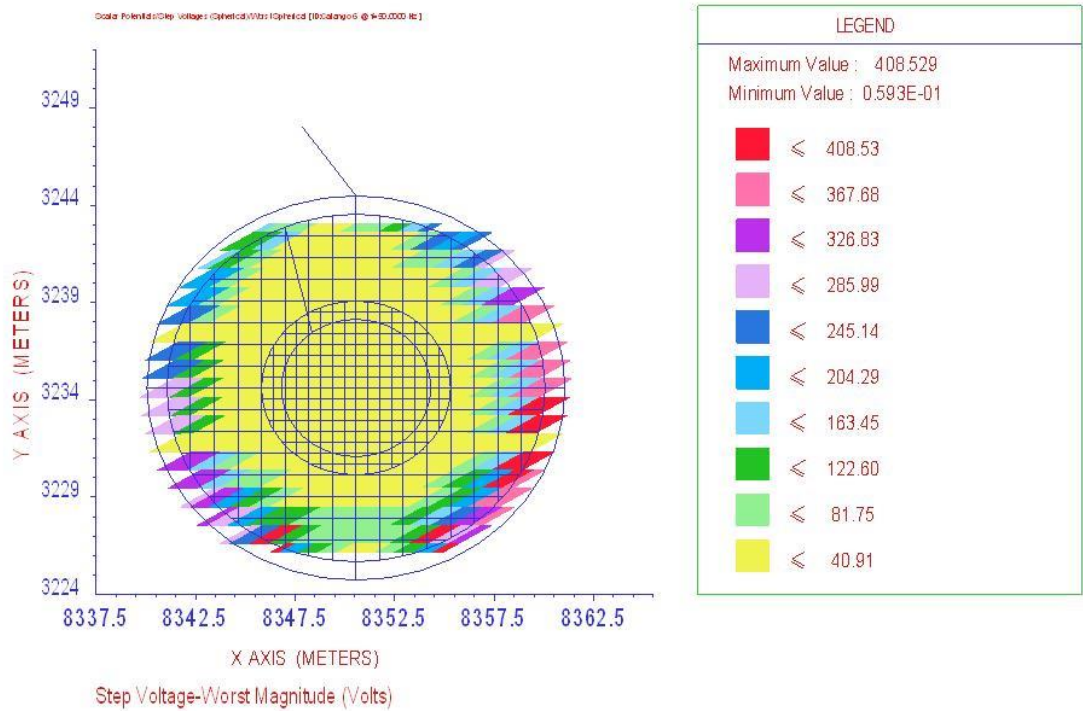
Turbina 3



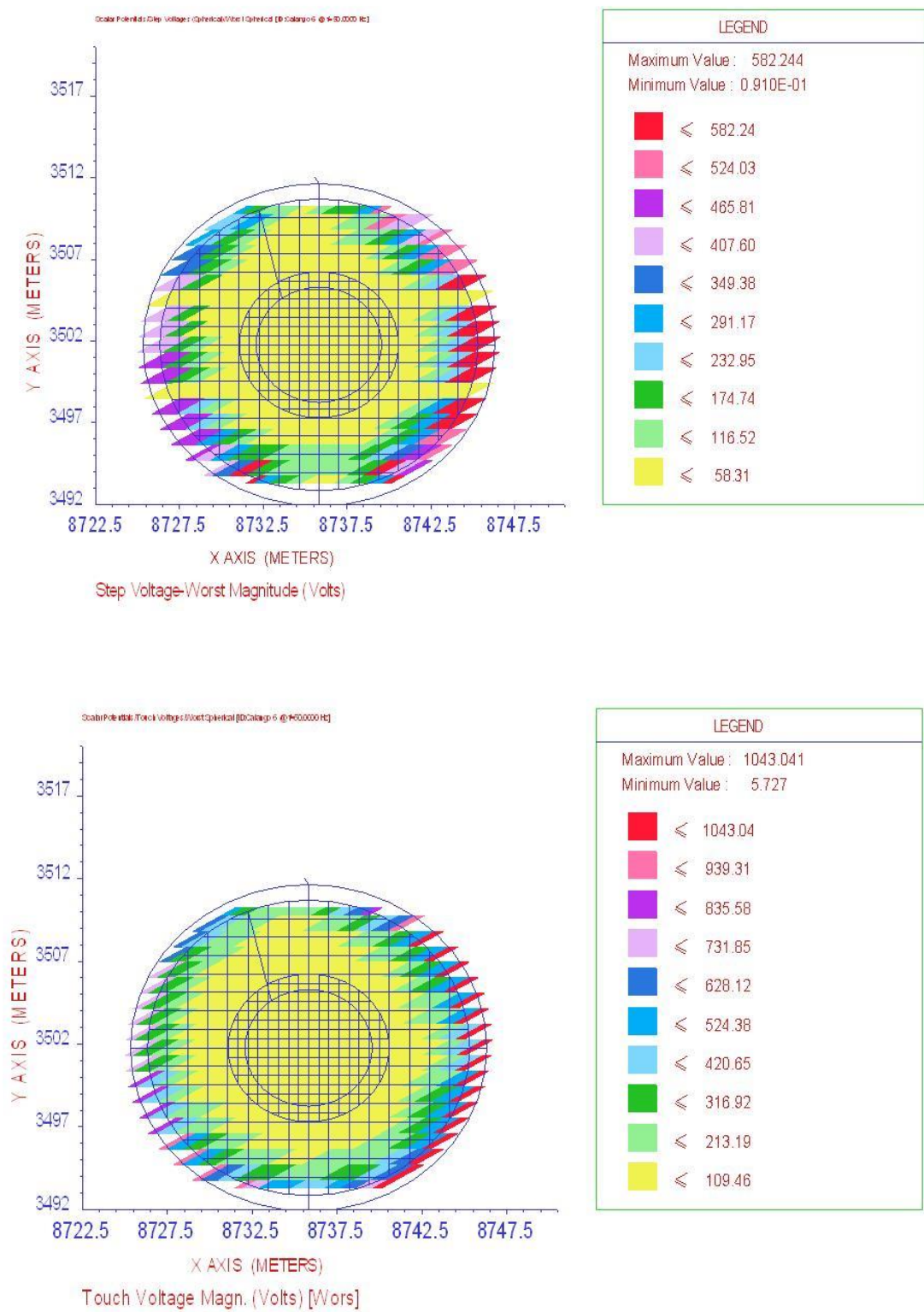
Turbina 4



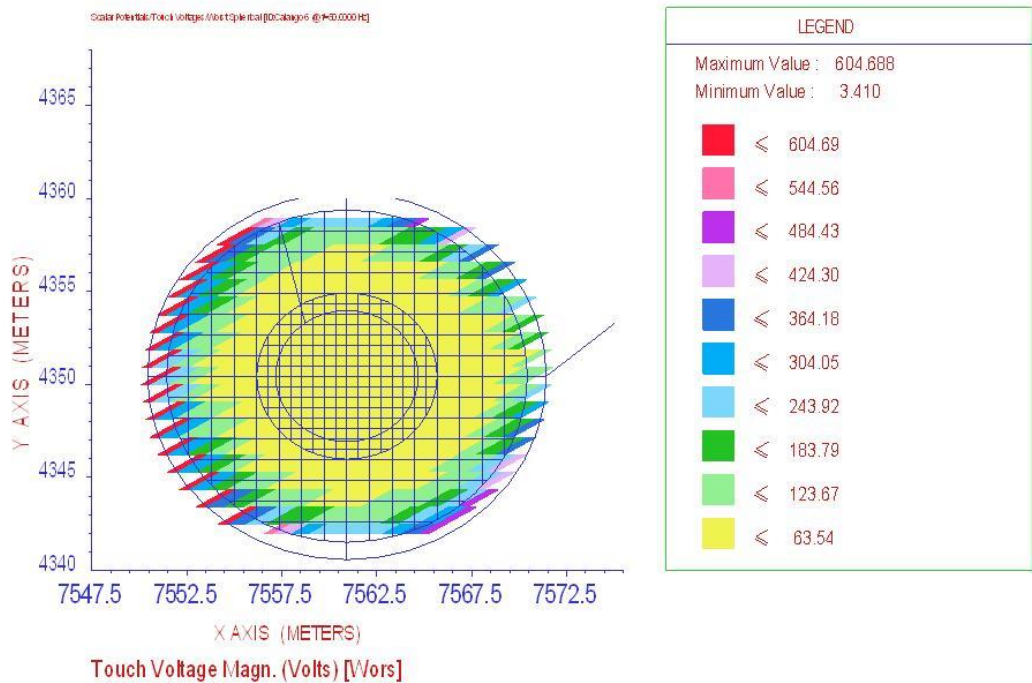
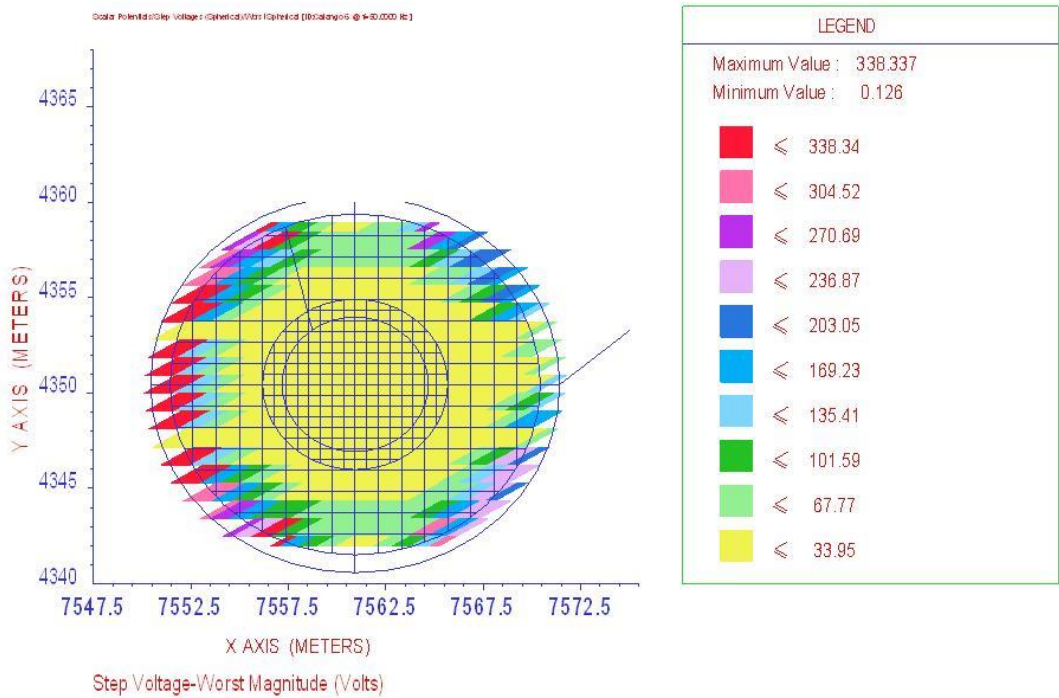
Turbina 5



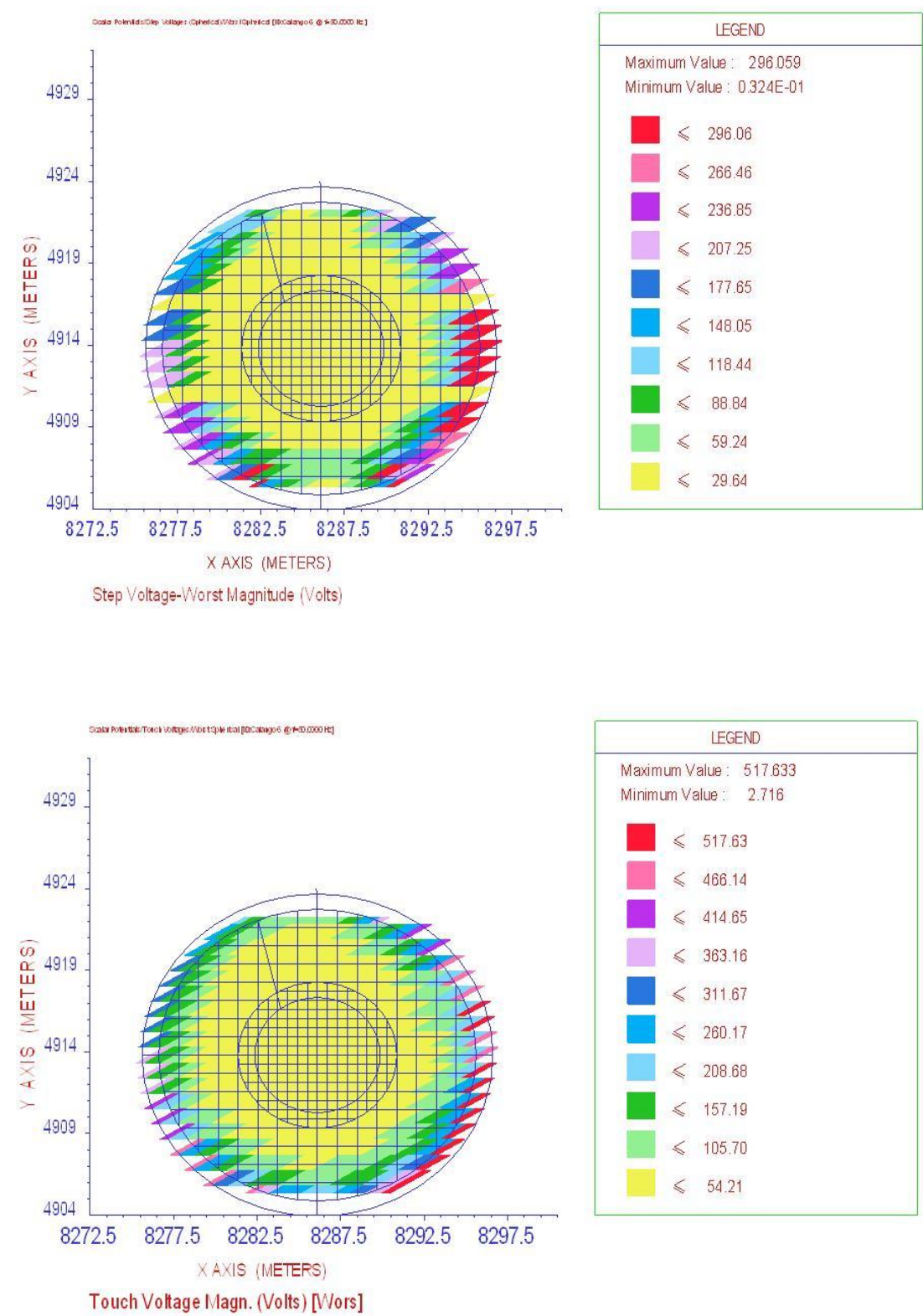
Turbina 6



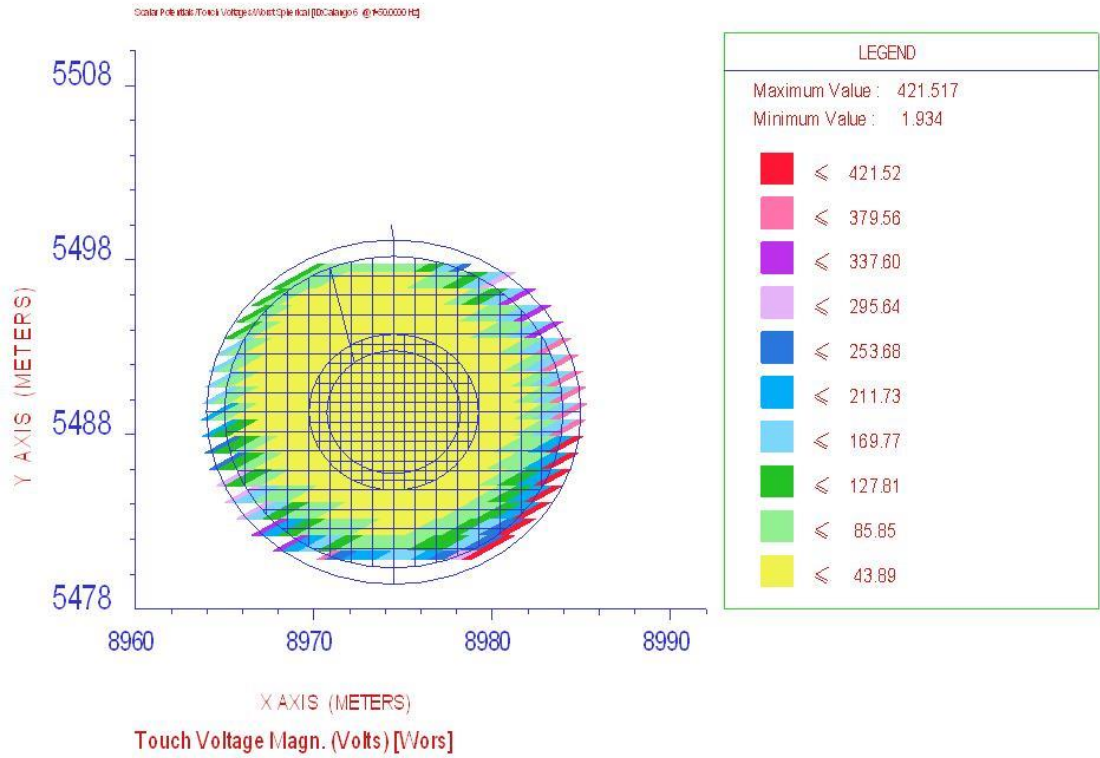
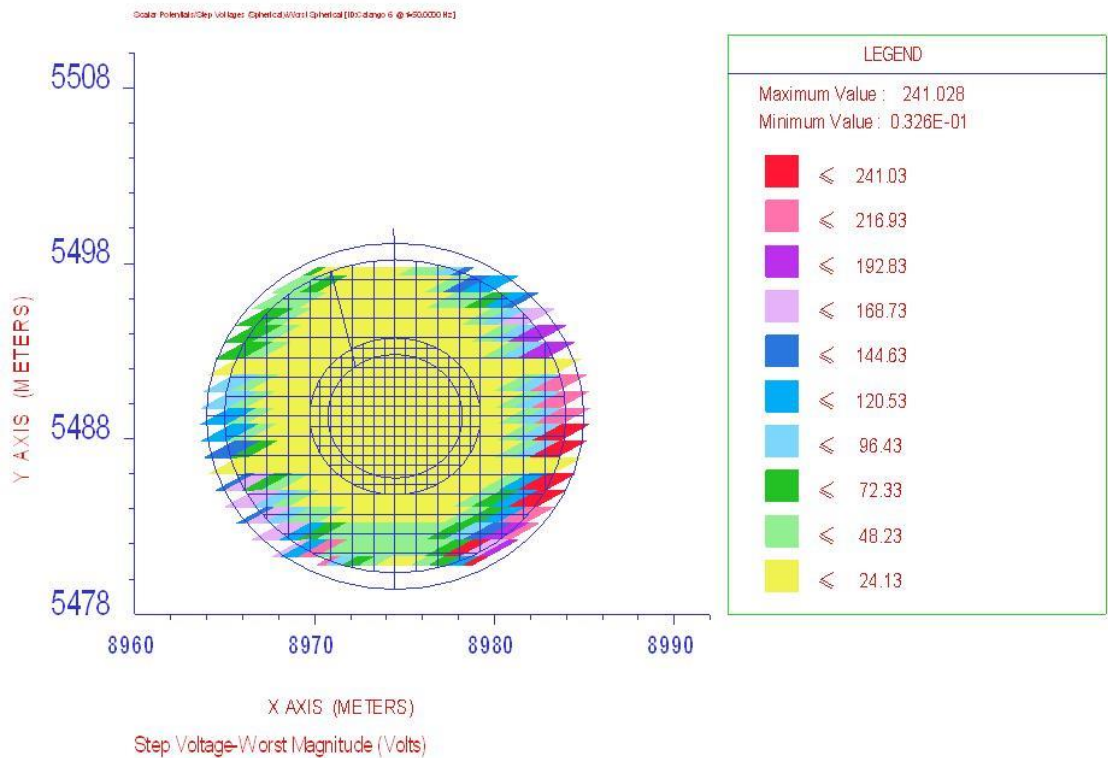
Turbina 7



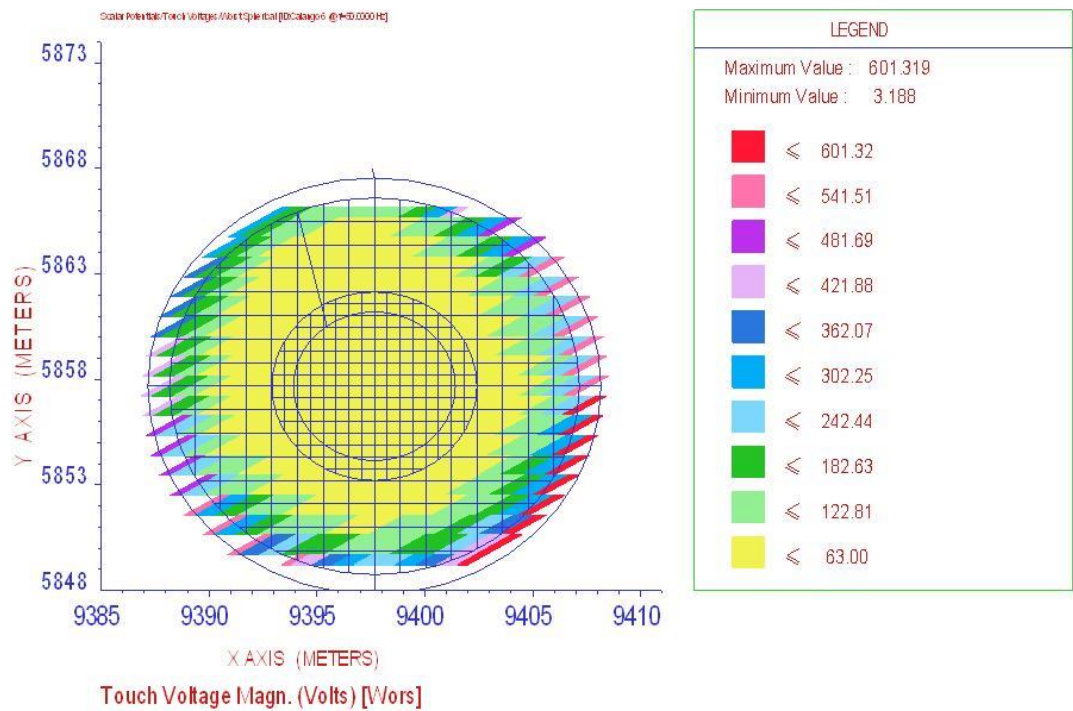
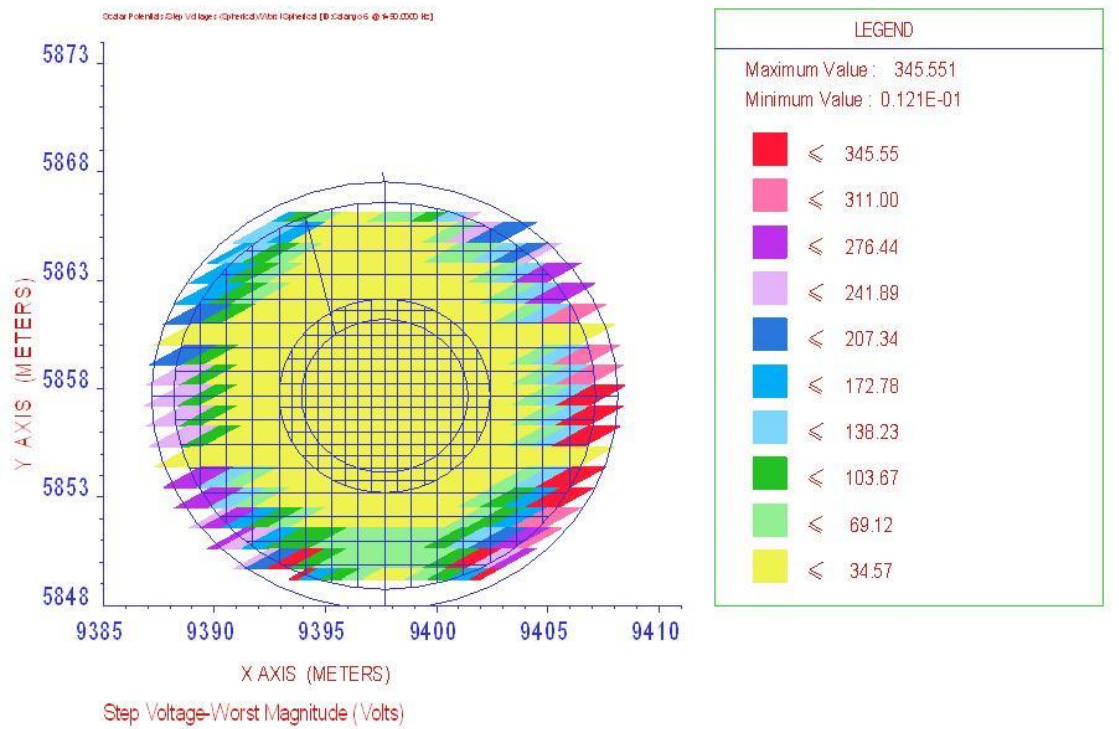
Turbina 8



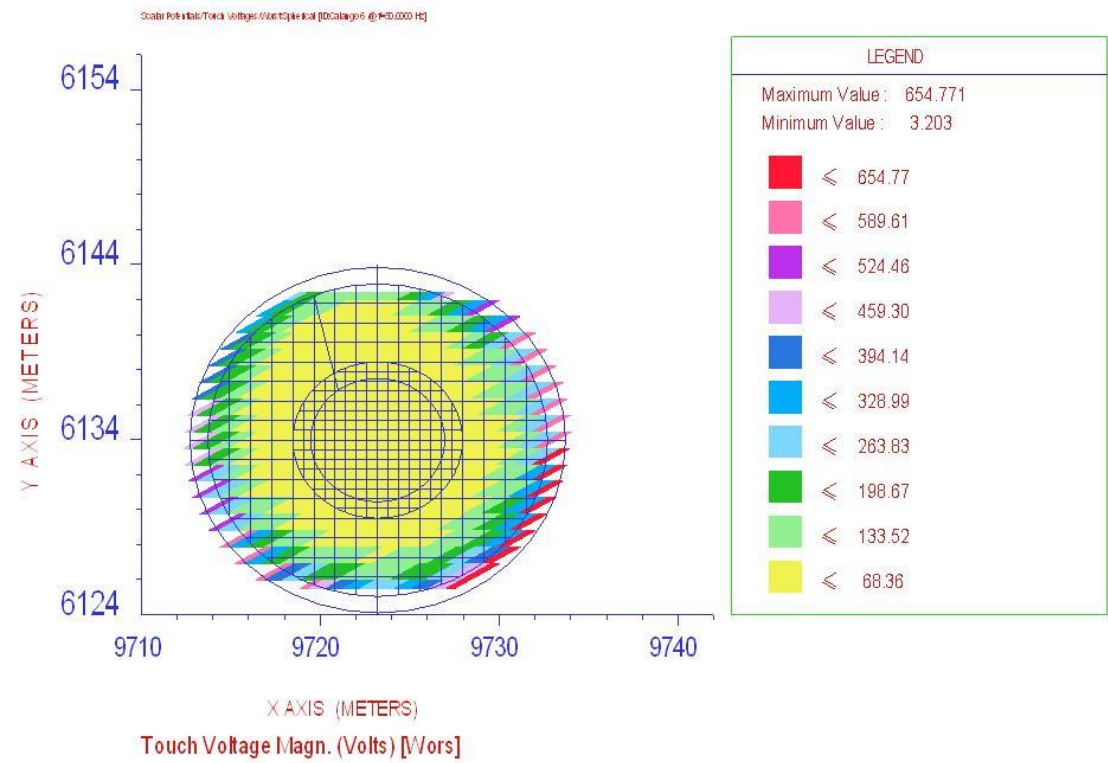
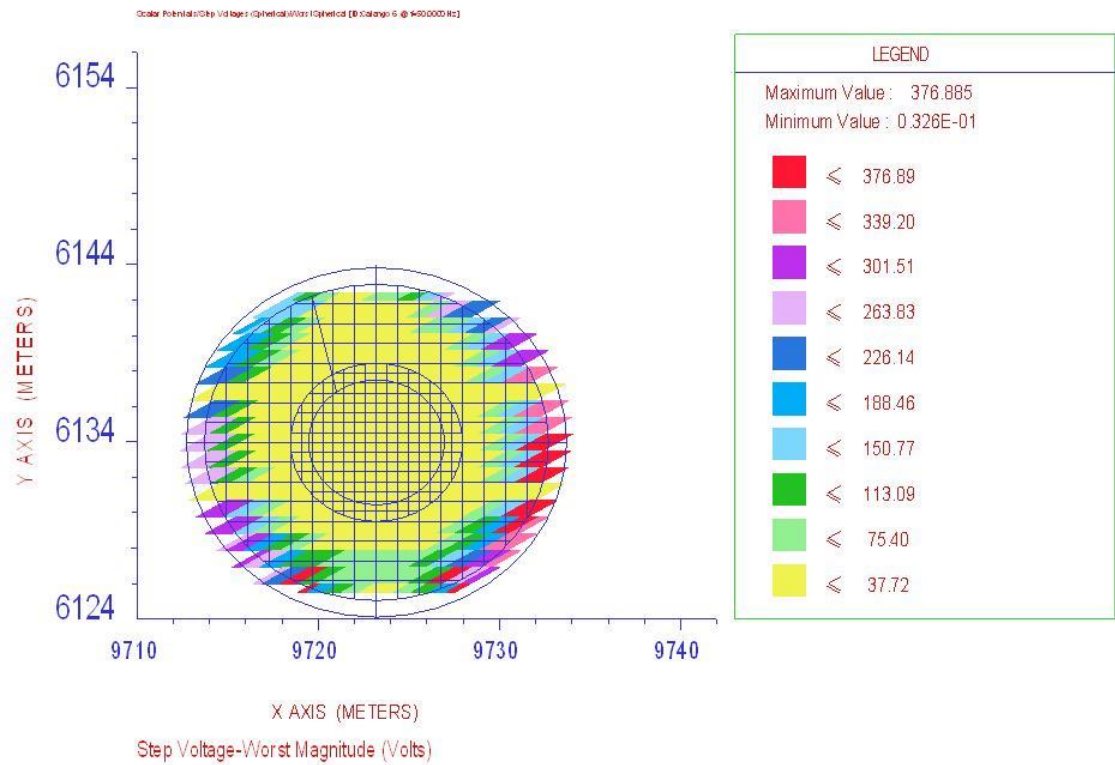
Turbina 9



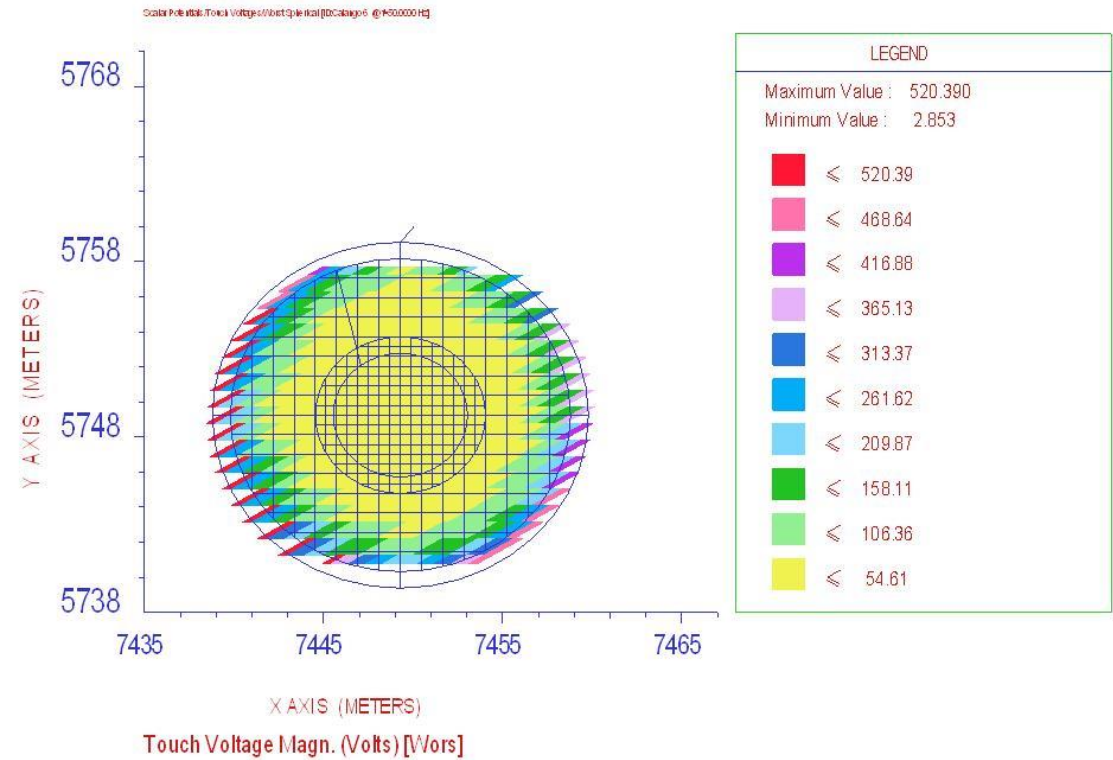
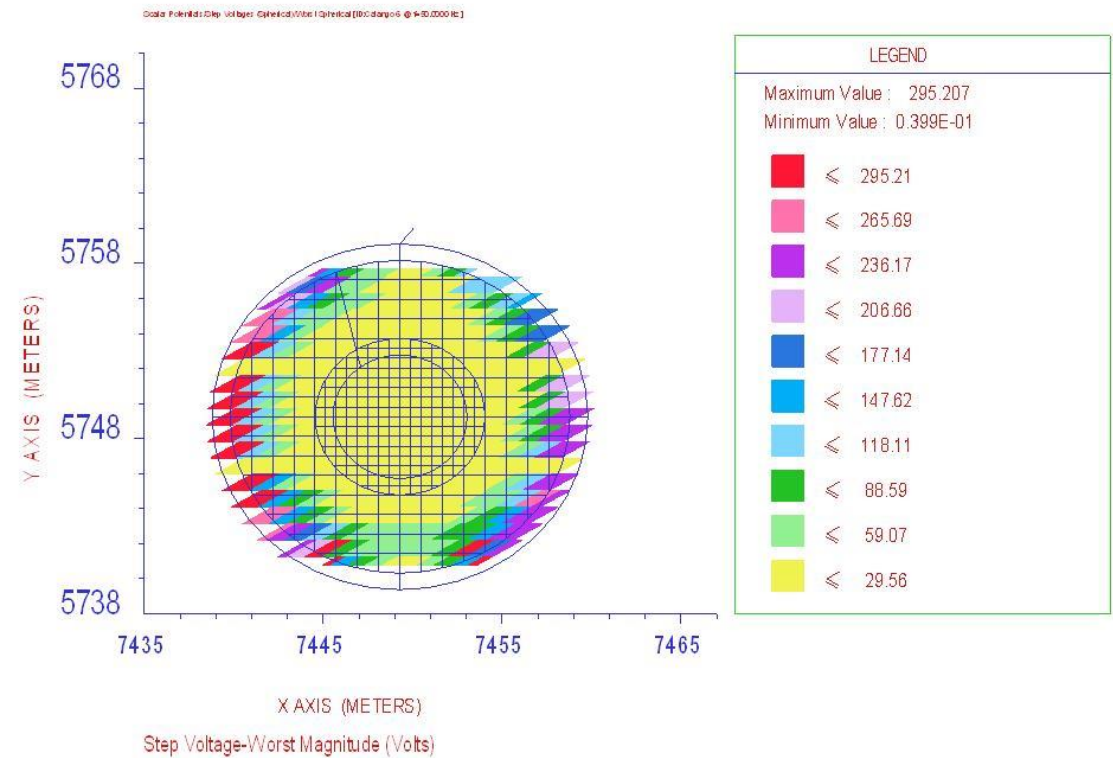
Turbina 10



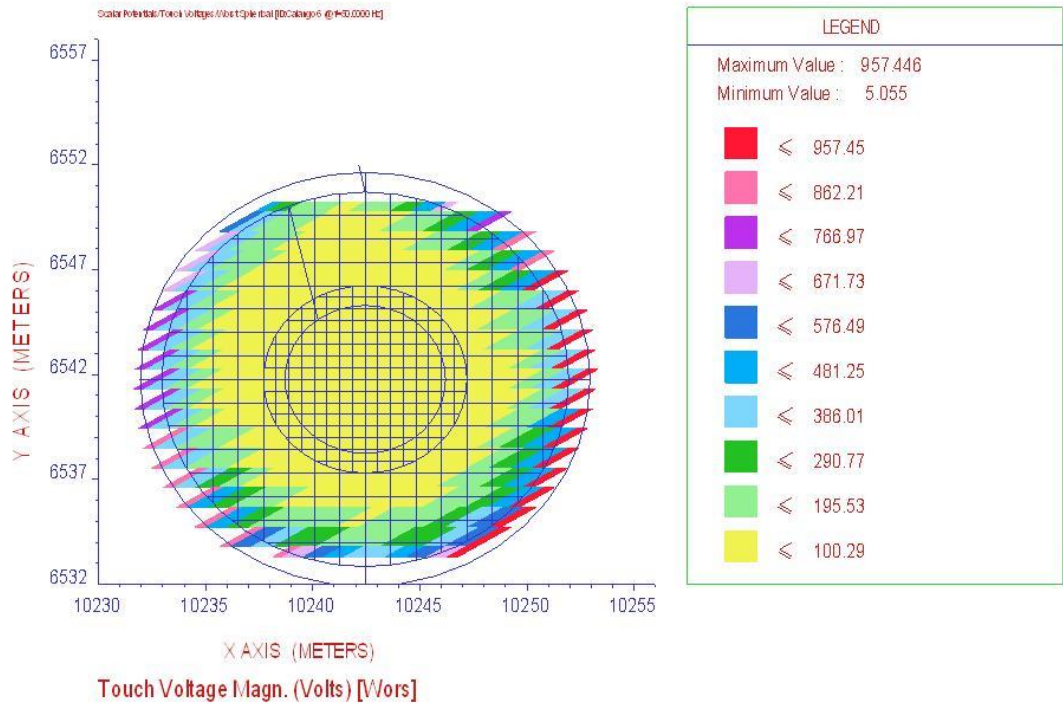
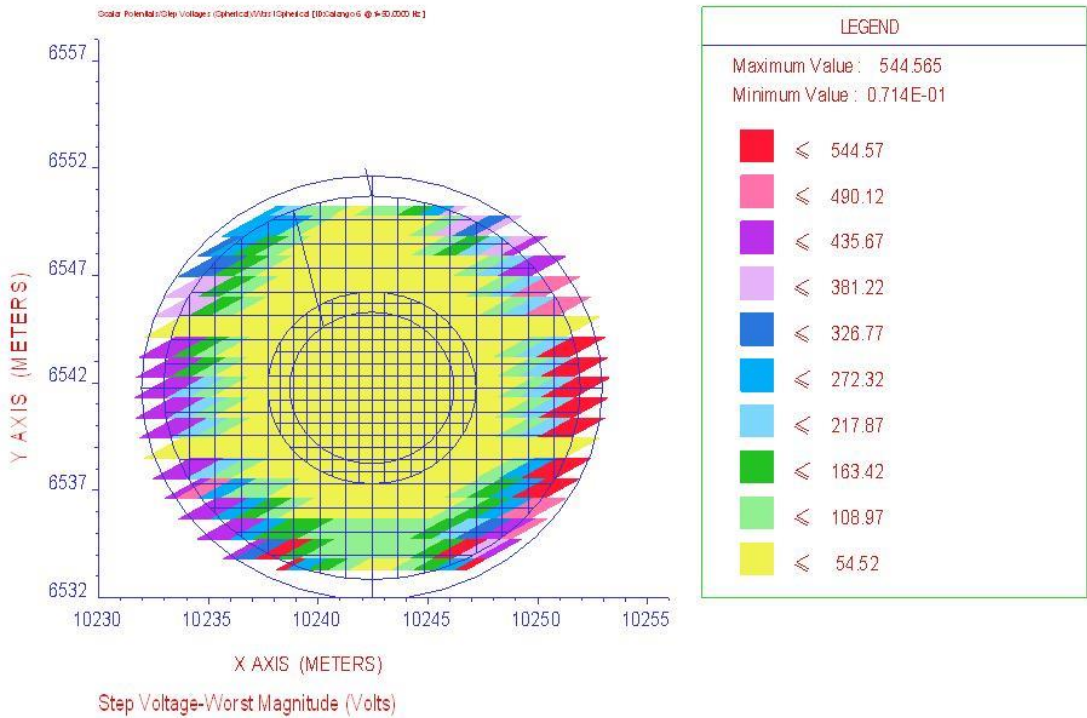
Turbina 11



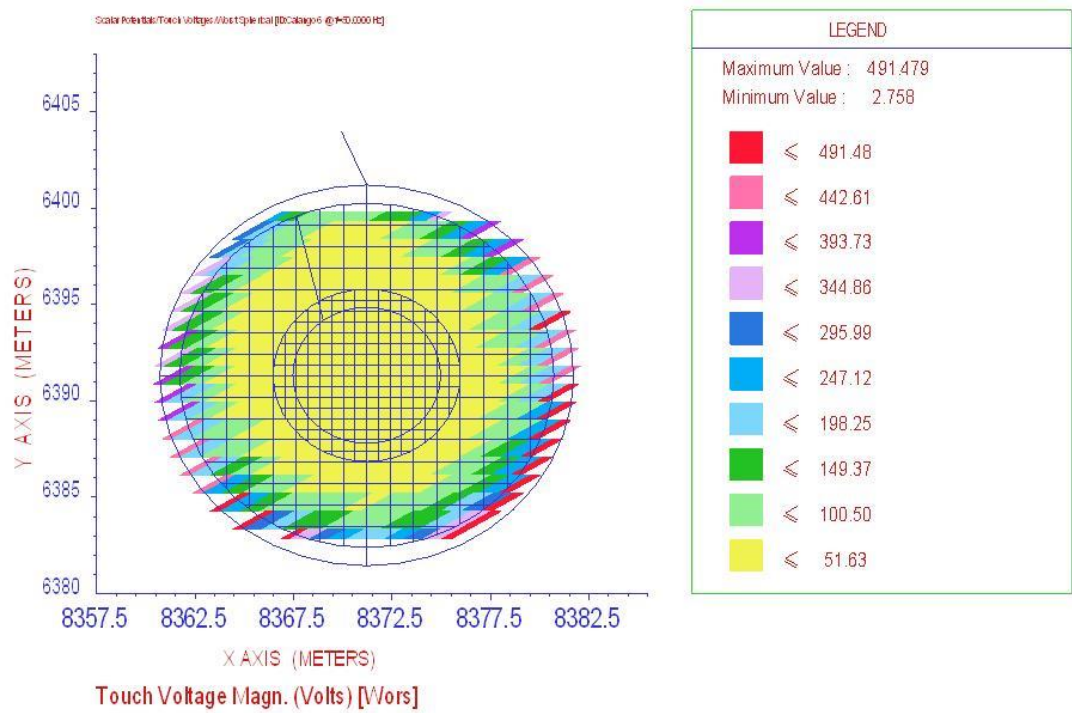
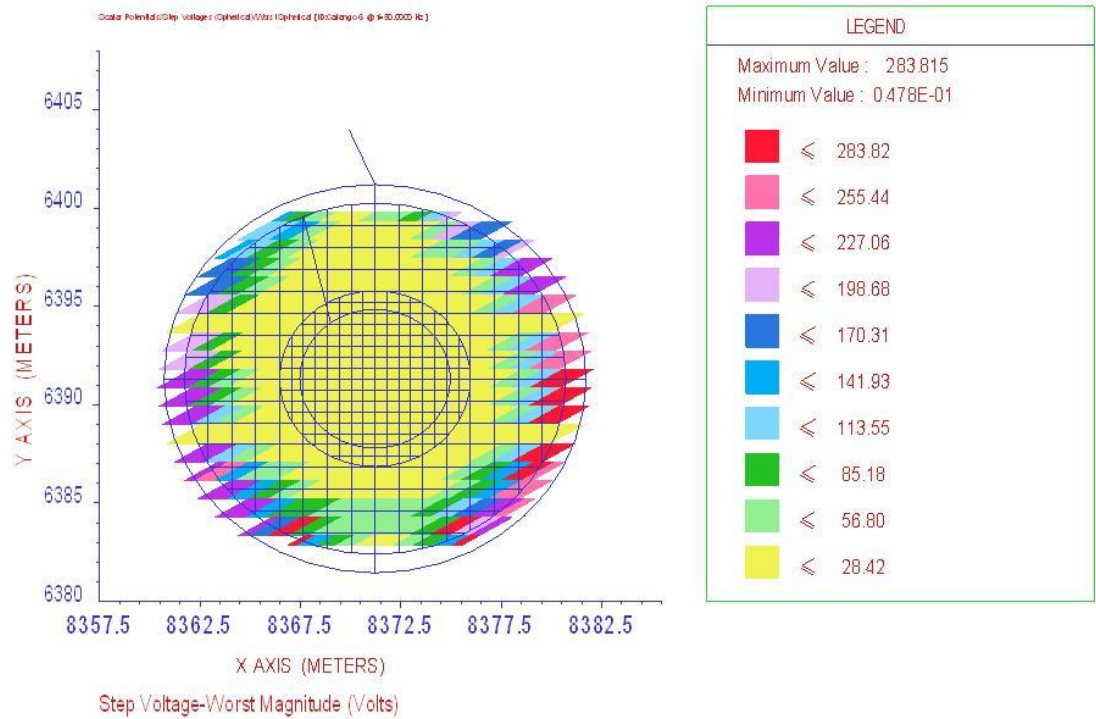
Turbina 12



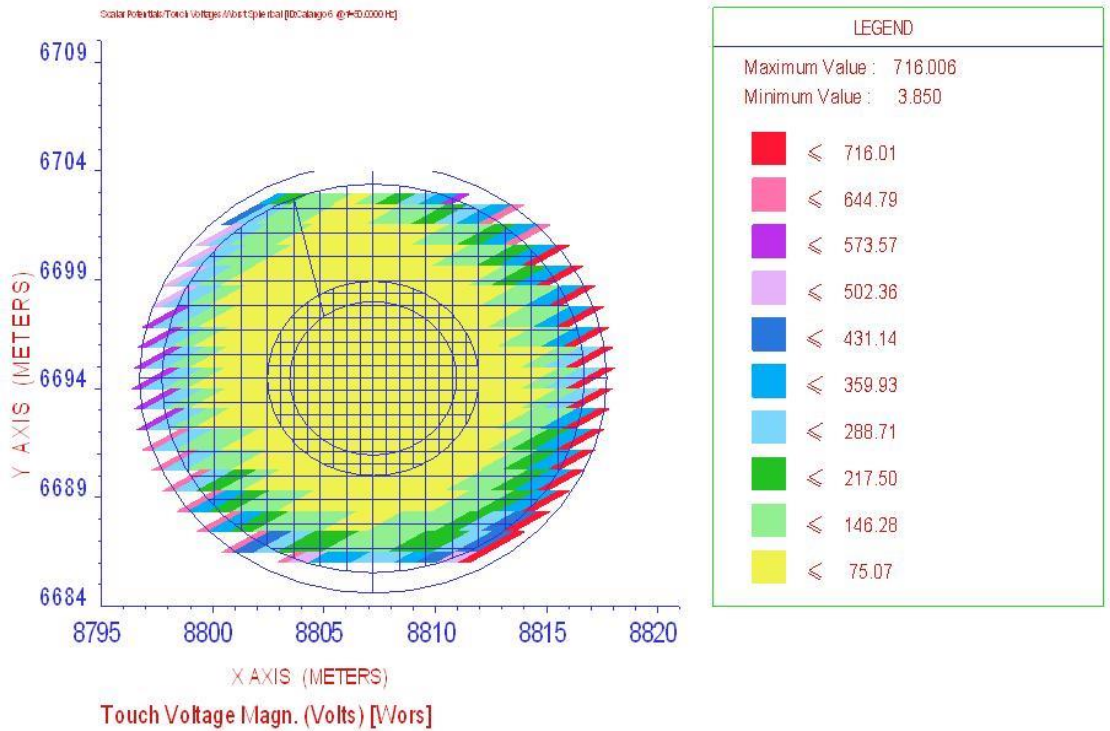
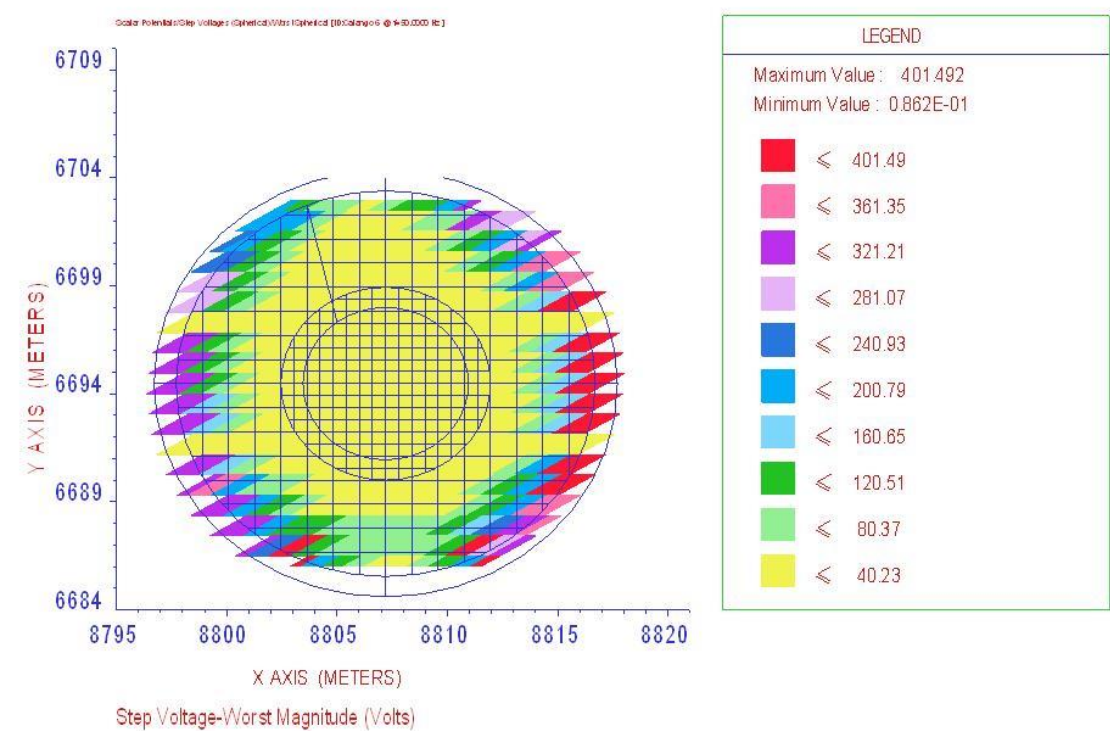
Turbina 13



Turbina 14

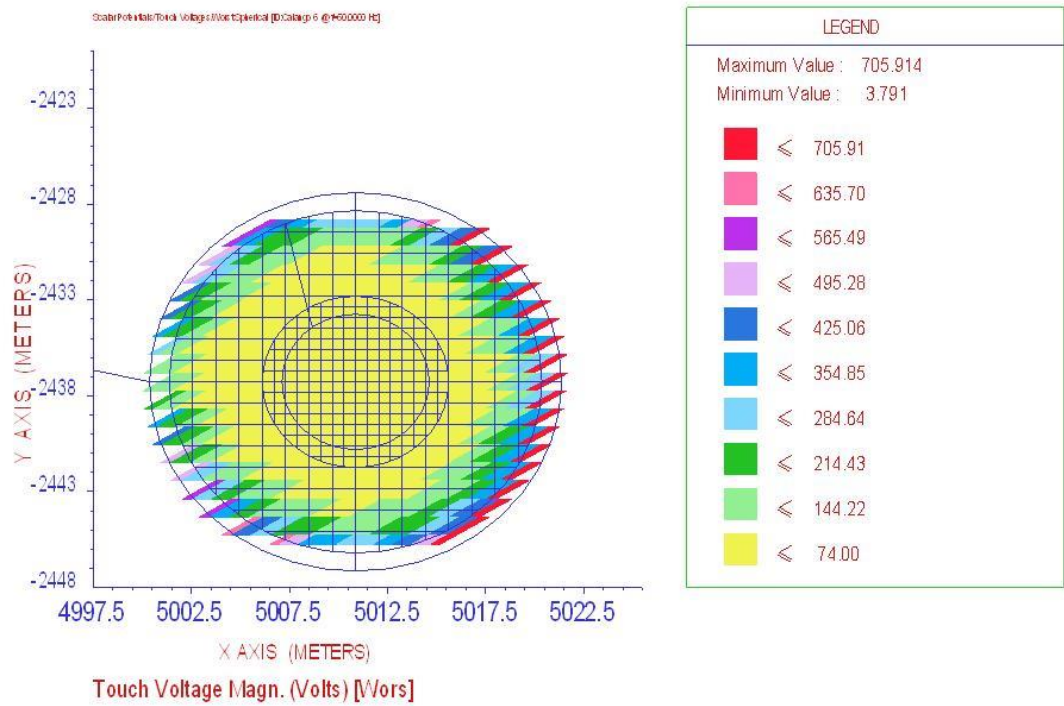
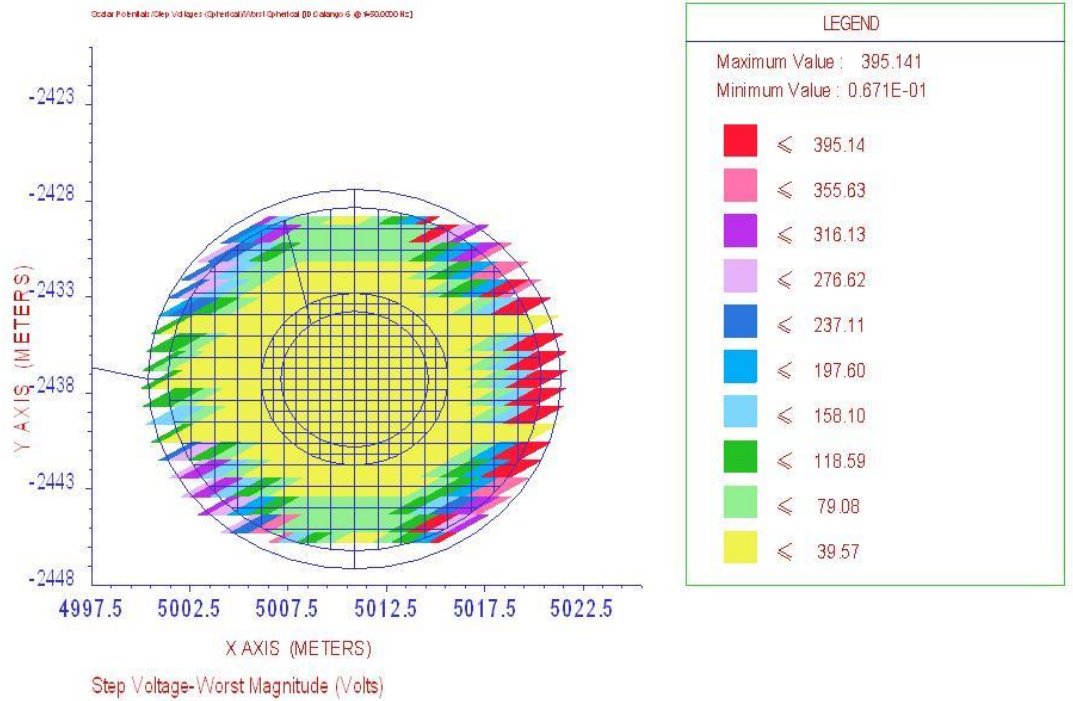


Turbina 15

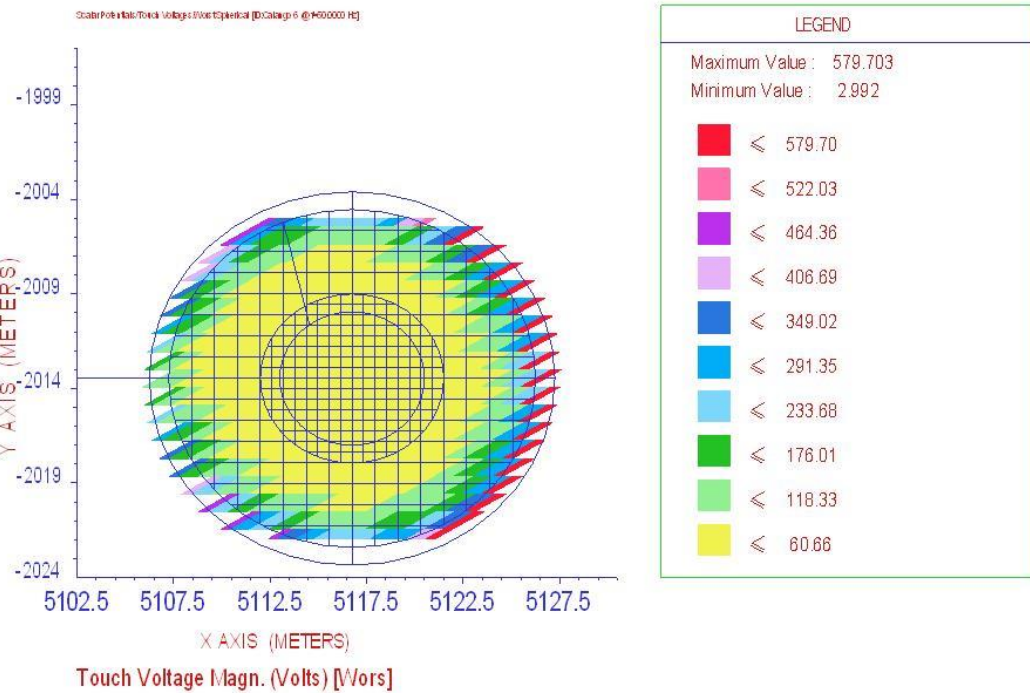
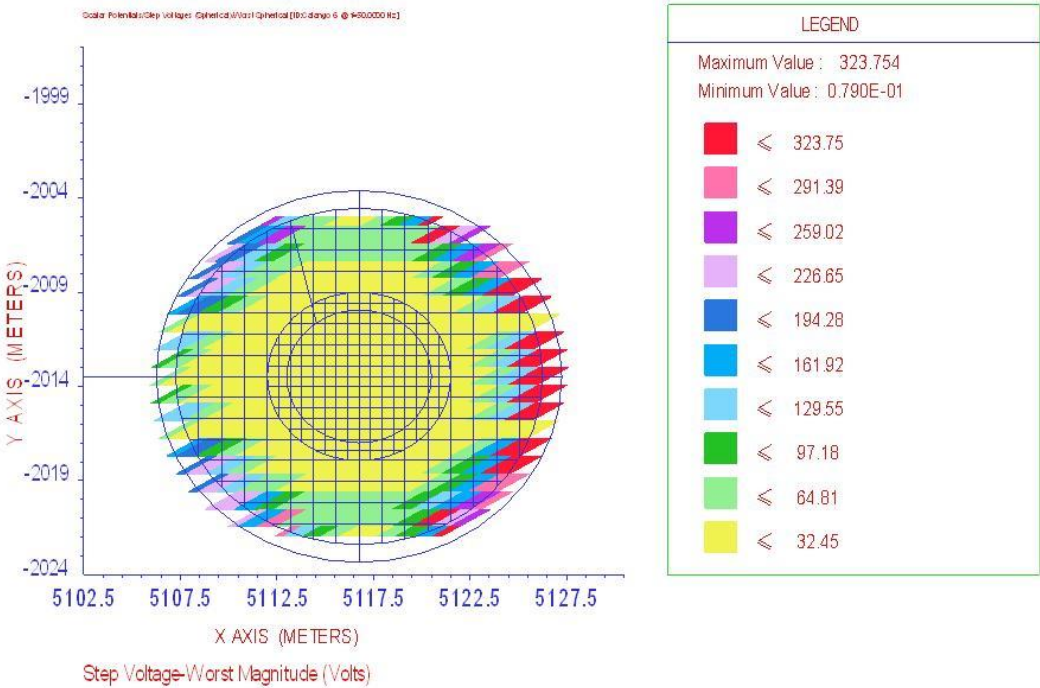


Parque eólico Santana I

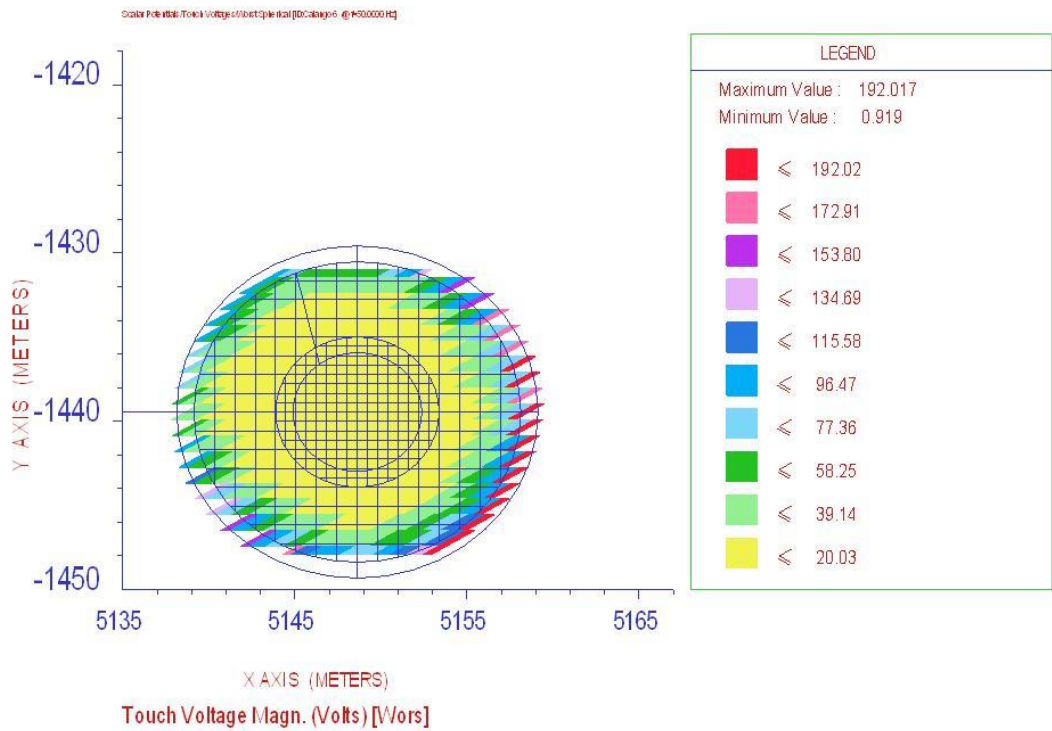
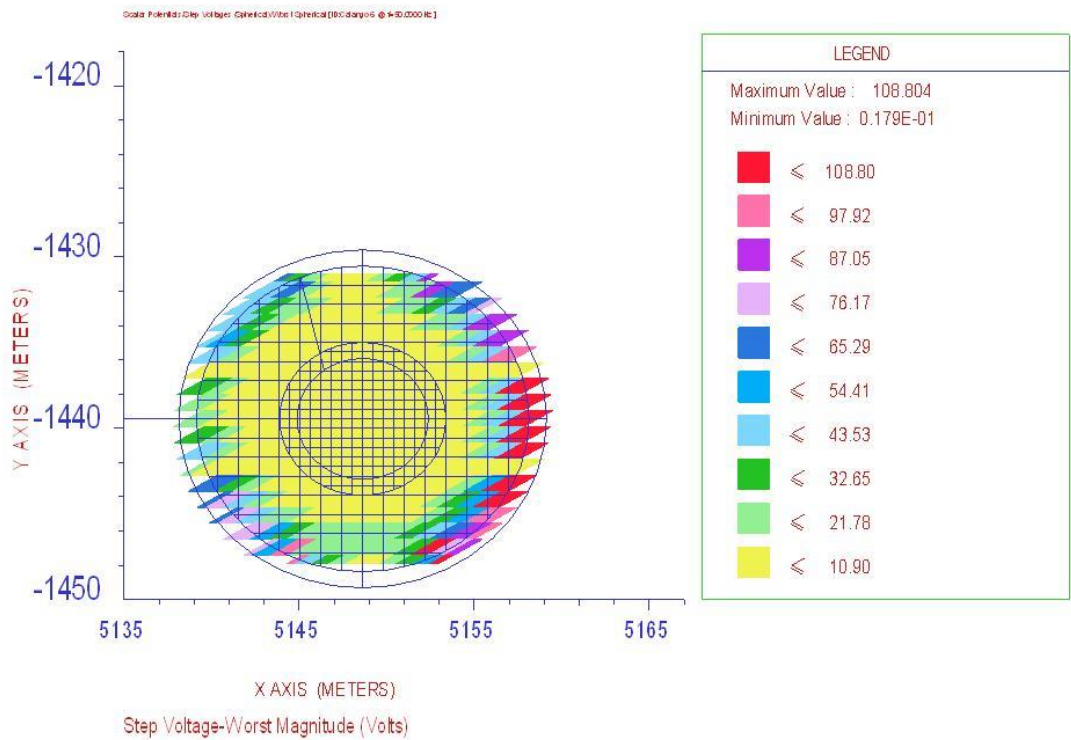
Turbina 1



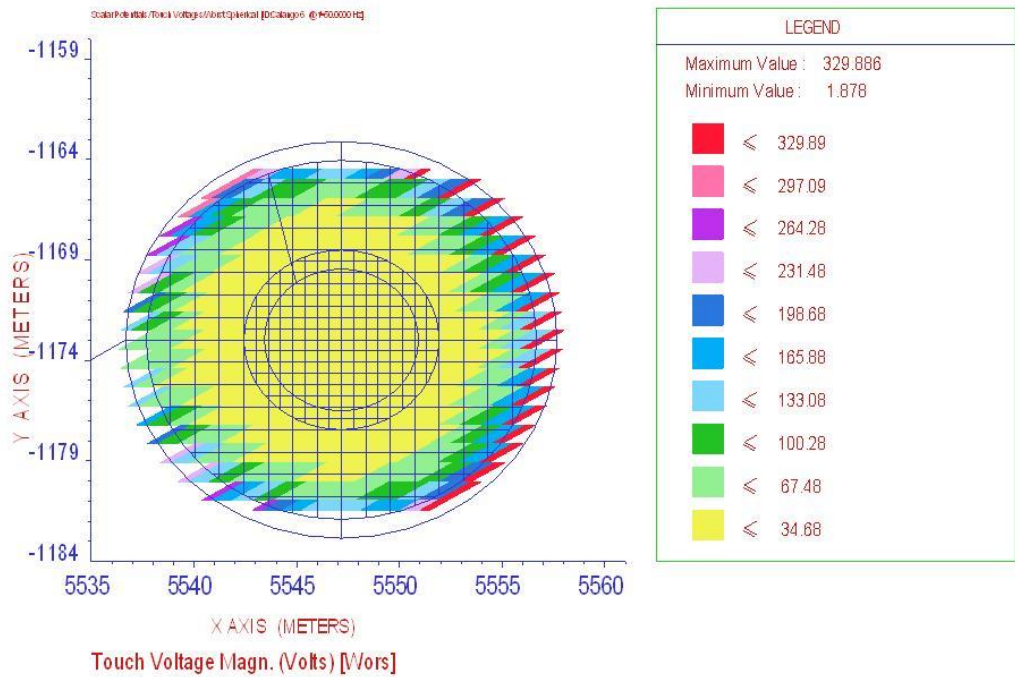
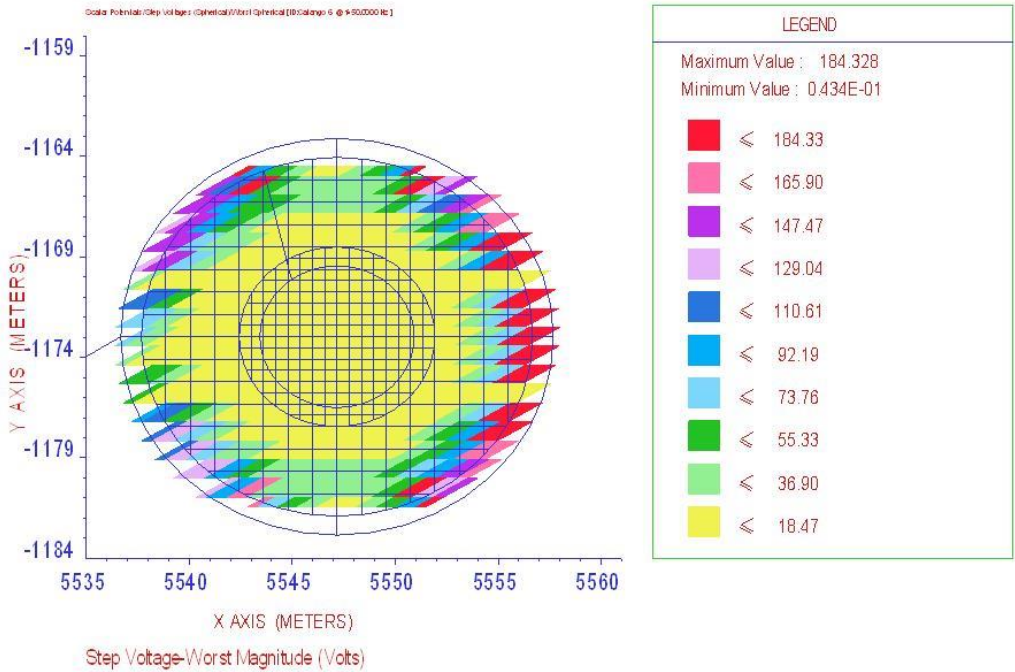
Turbina 2



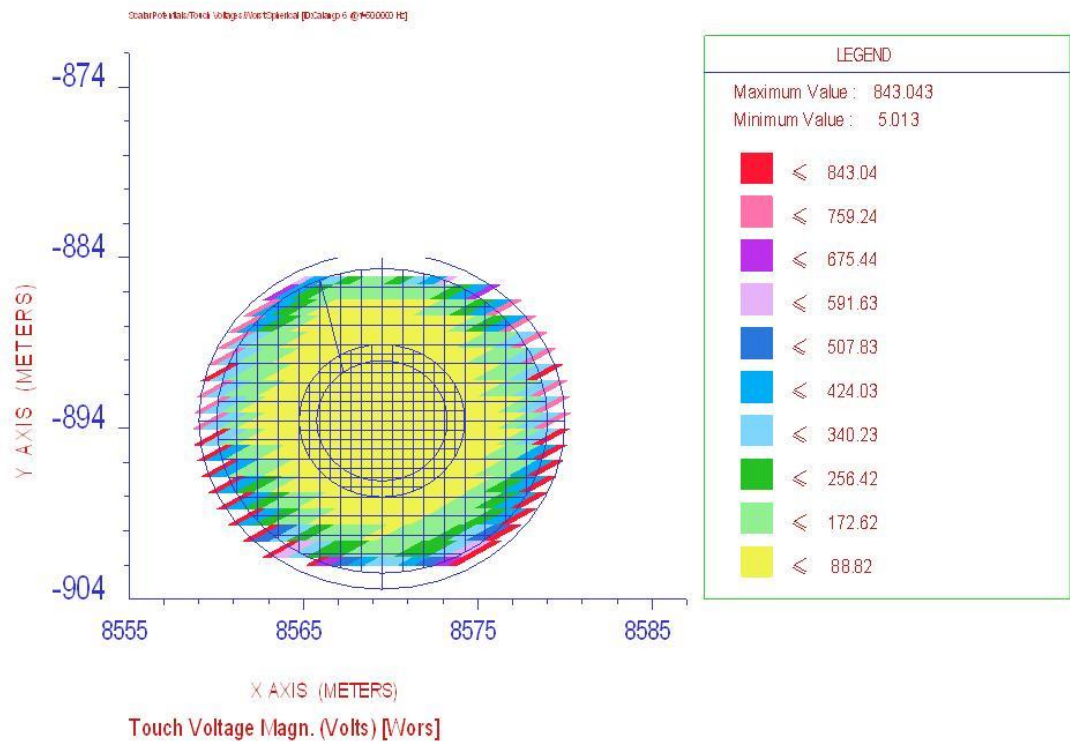
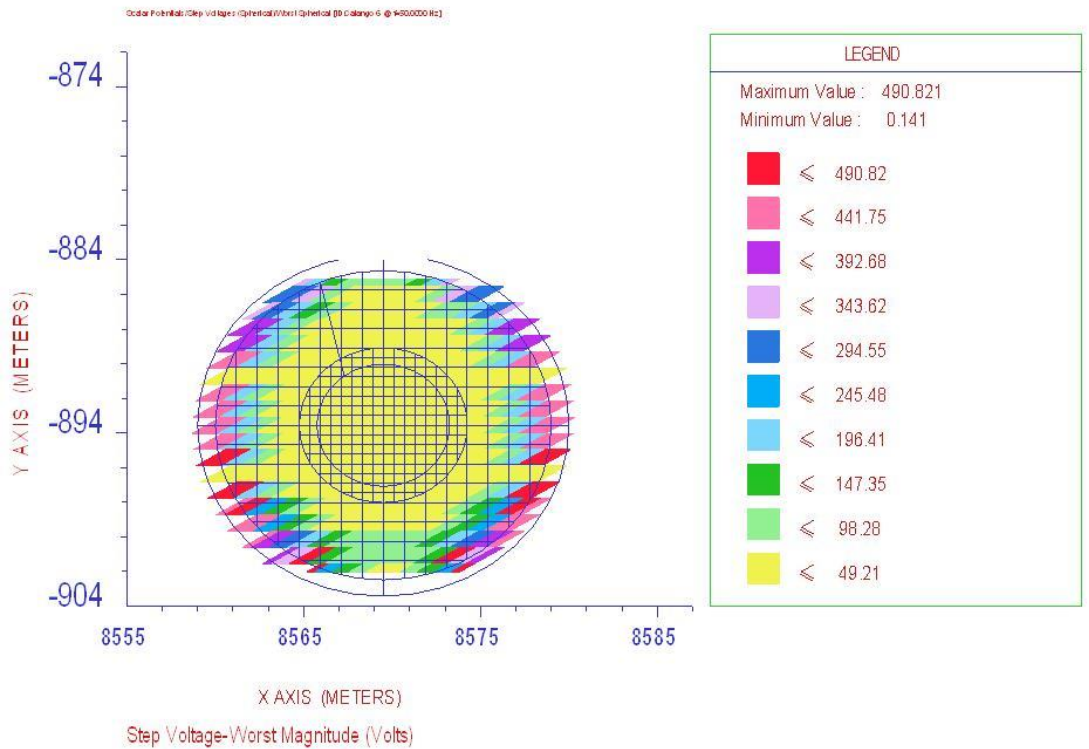
Turbina 3



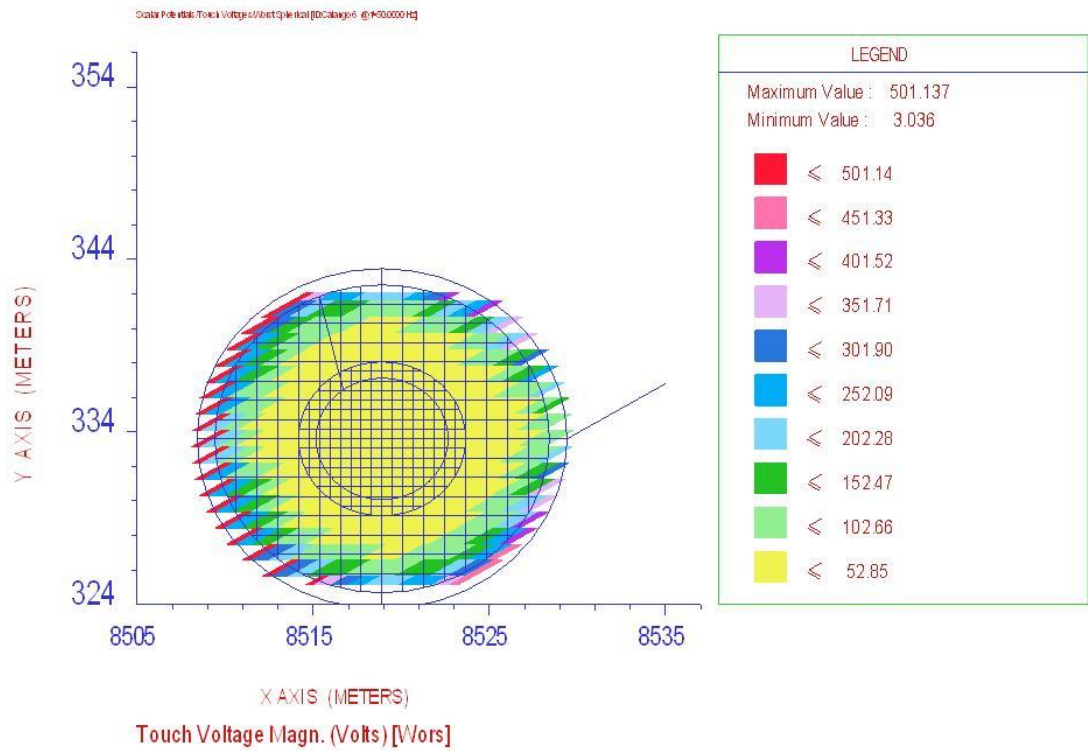
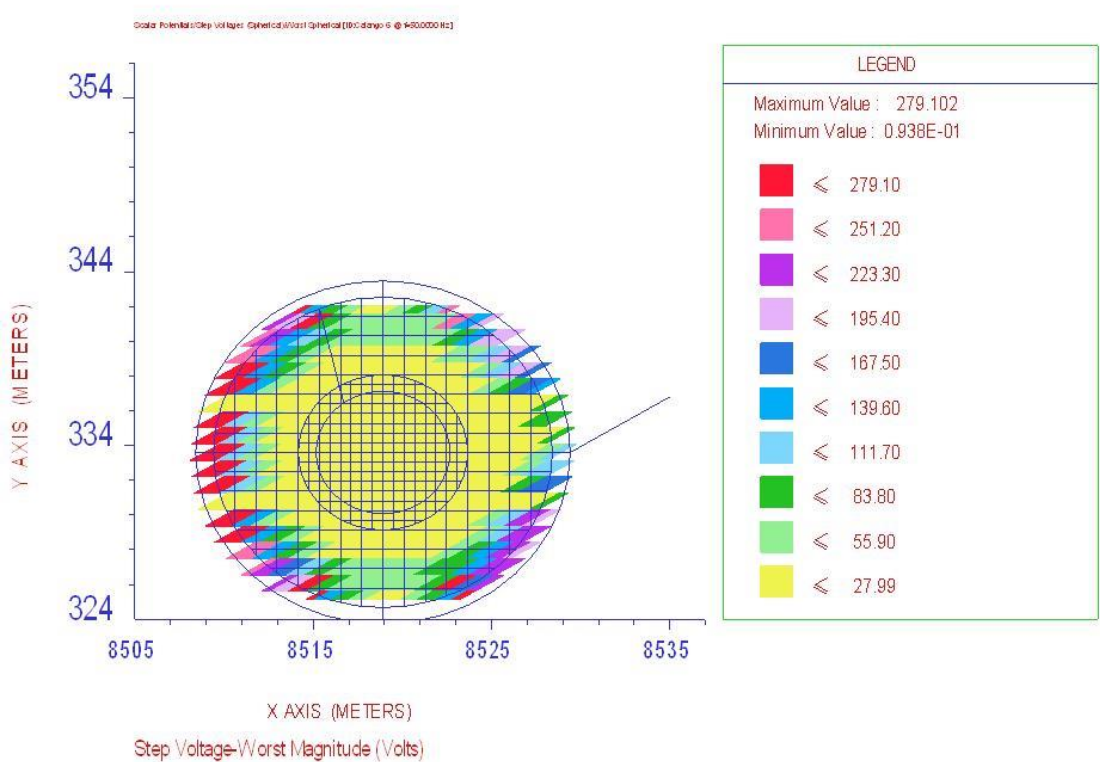
Turbina 4



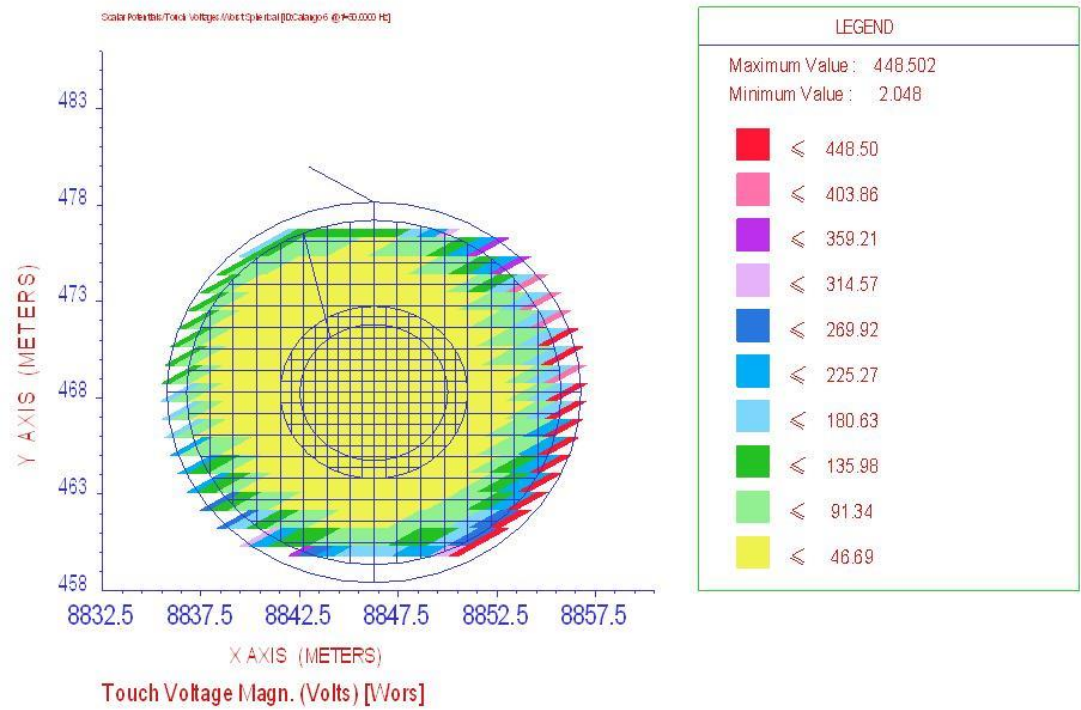
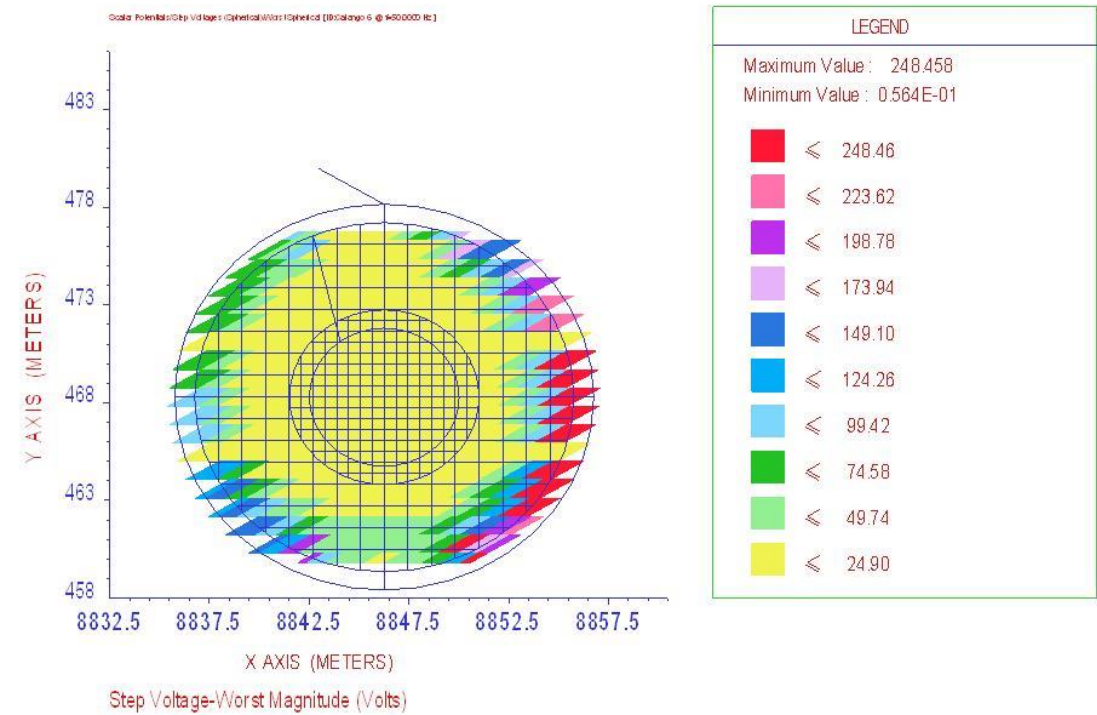
Turbina 5



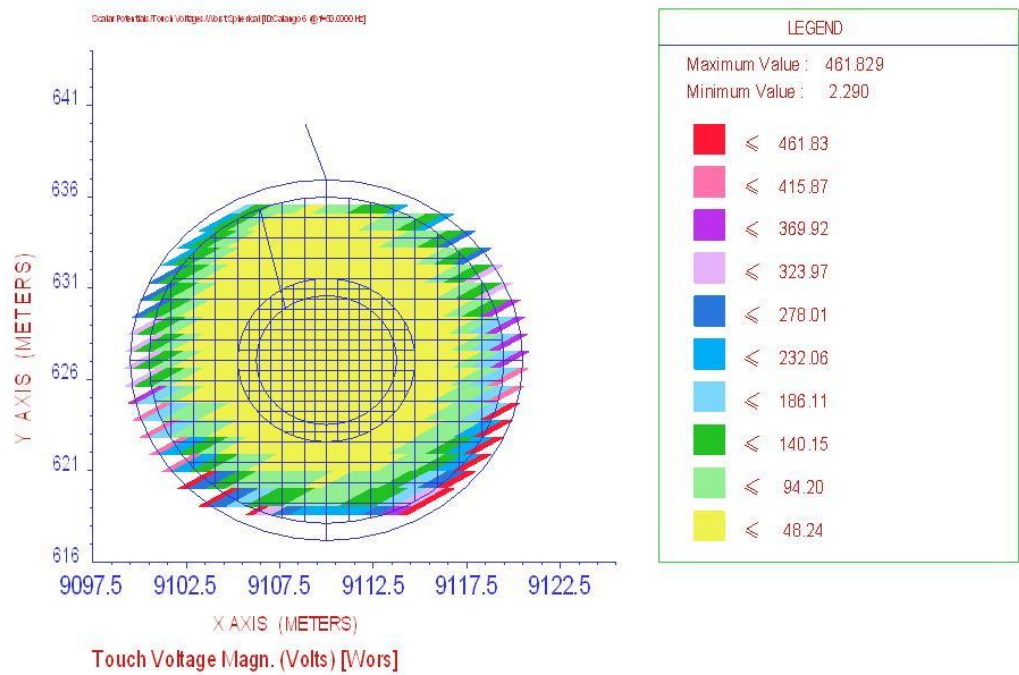
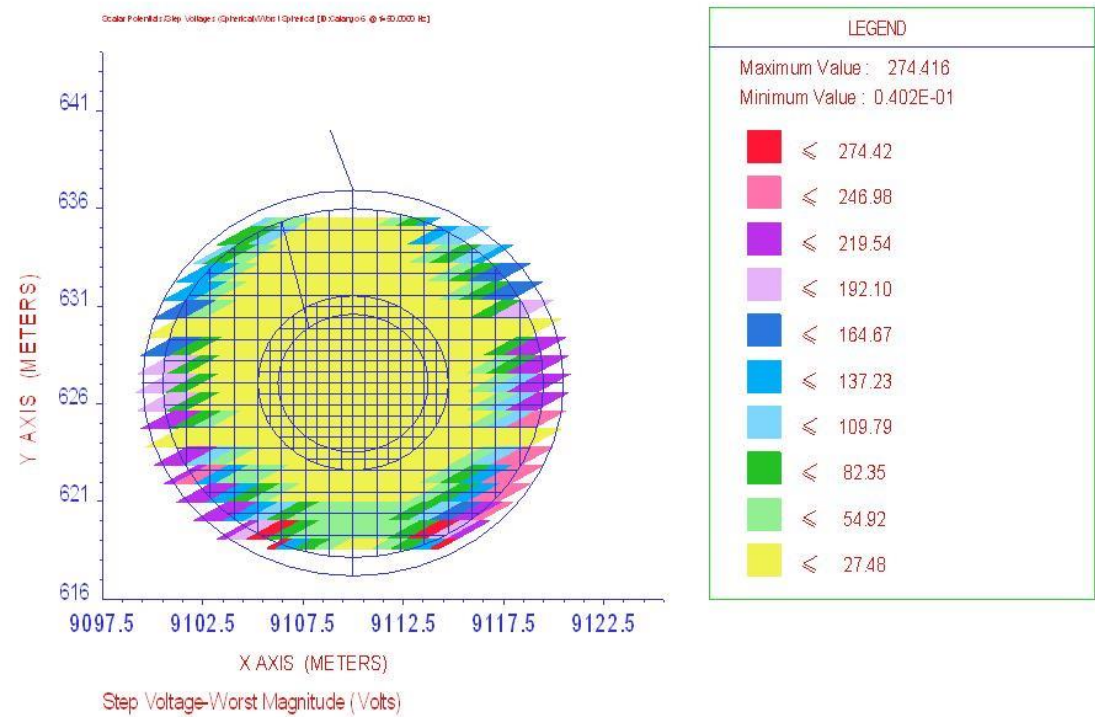
Turbina 6



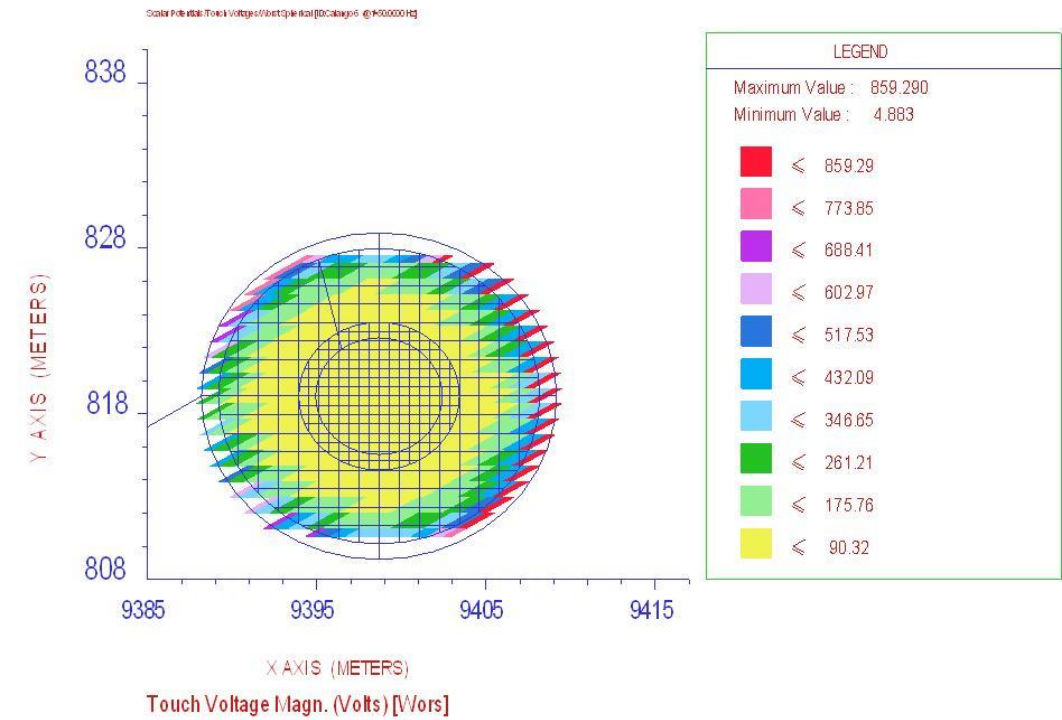
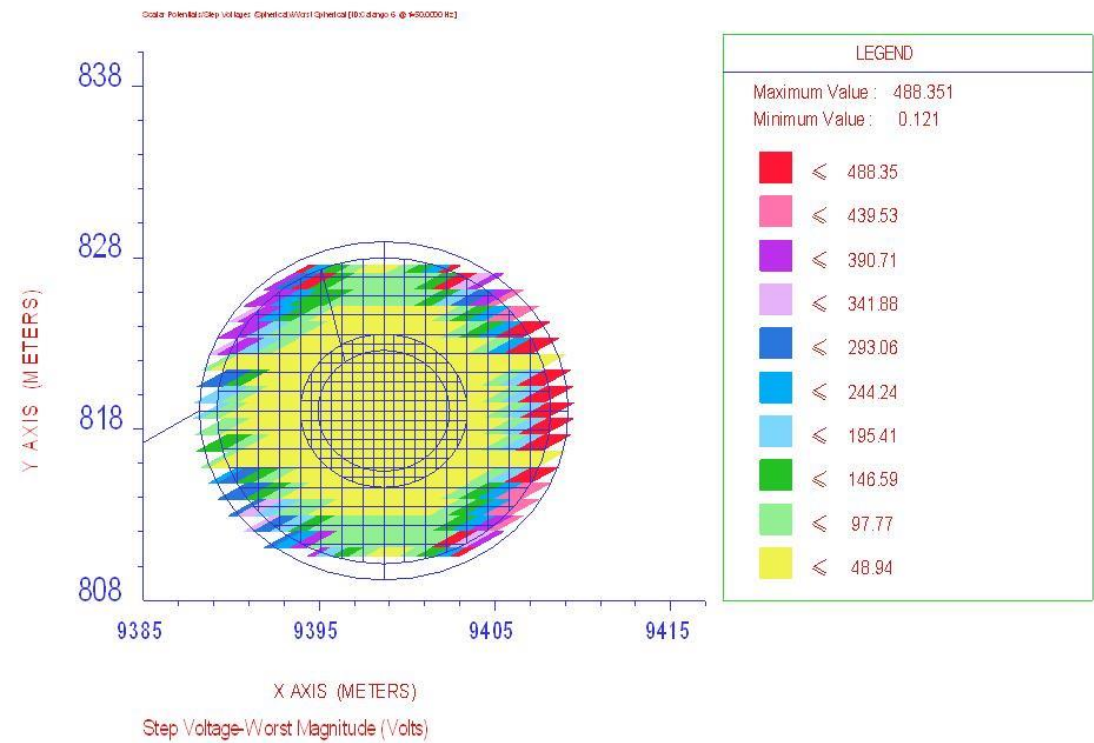
Turbina 7



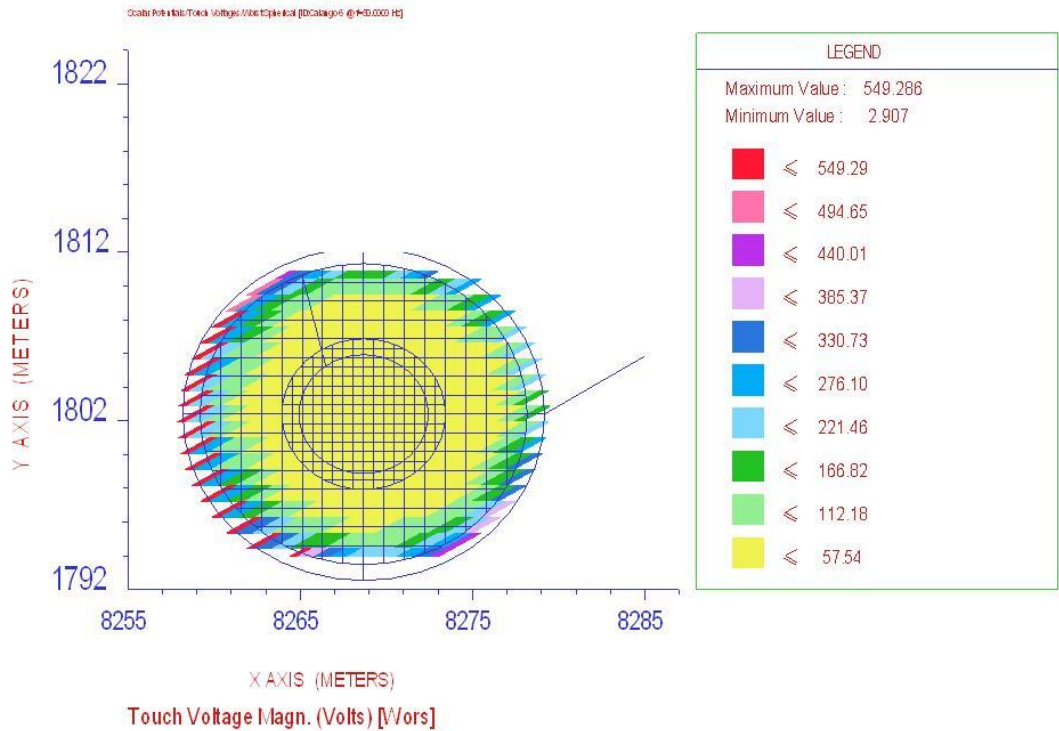
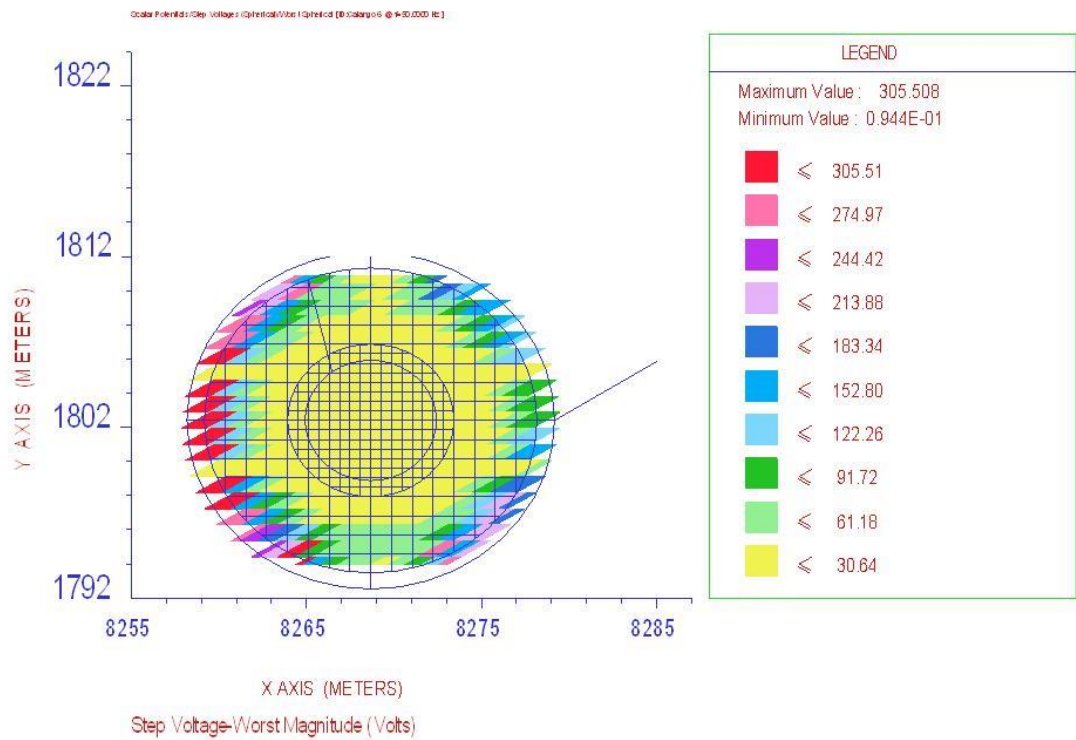
Turbina 8



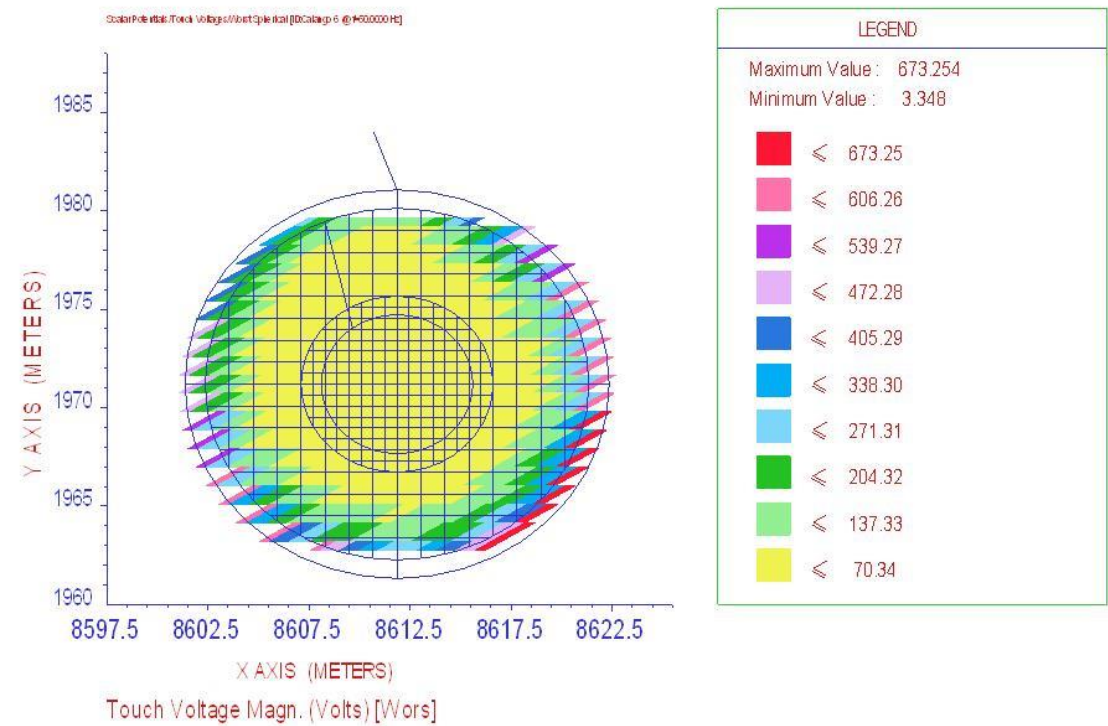
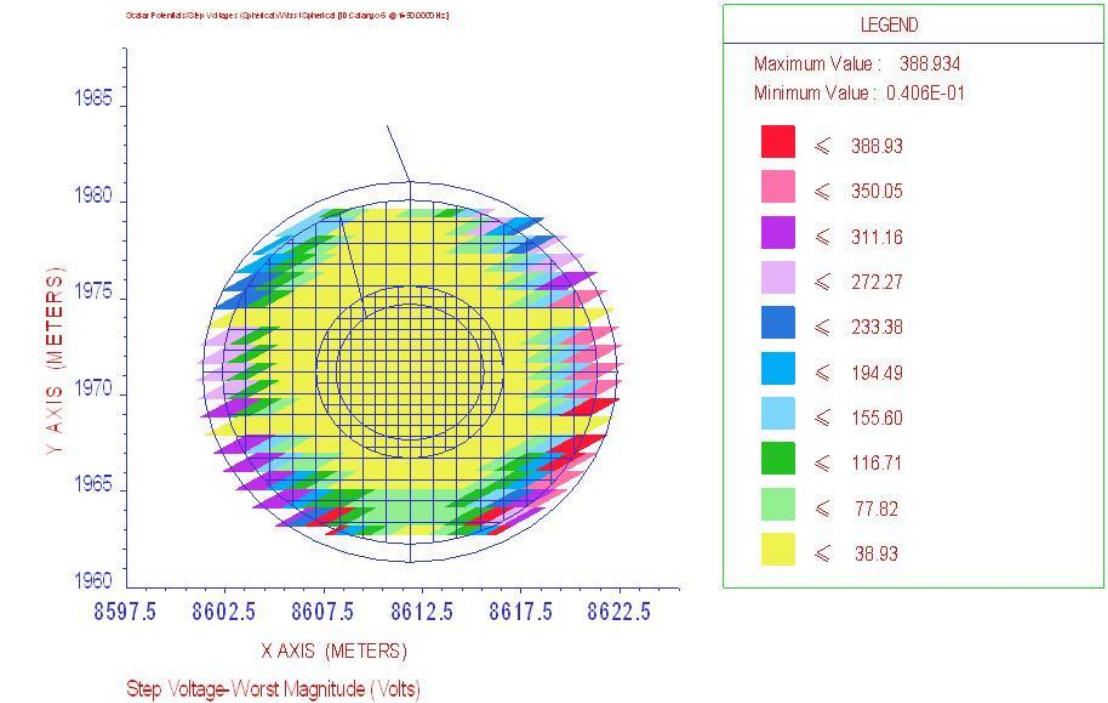
Turbina 9



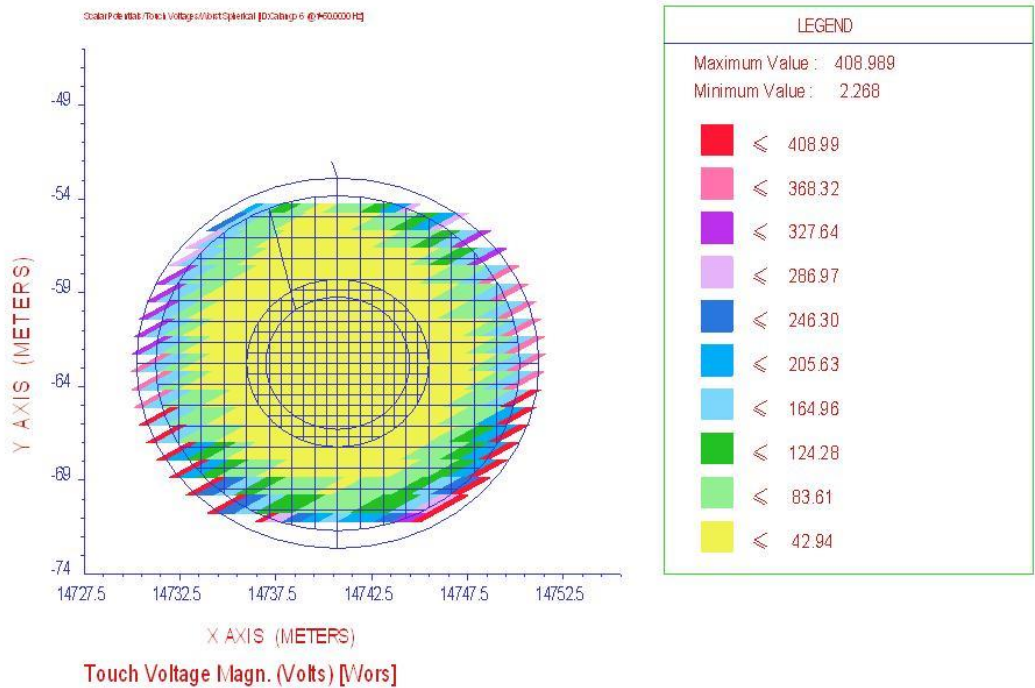
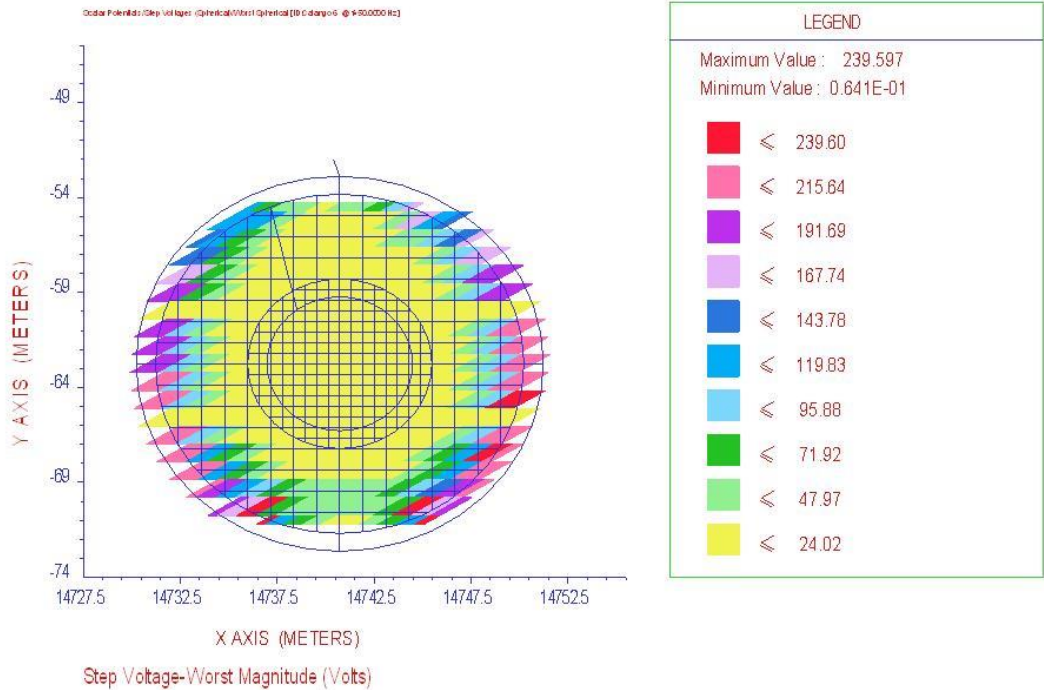
Turbina 10



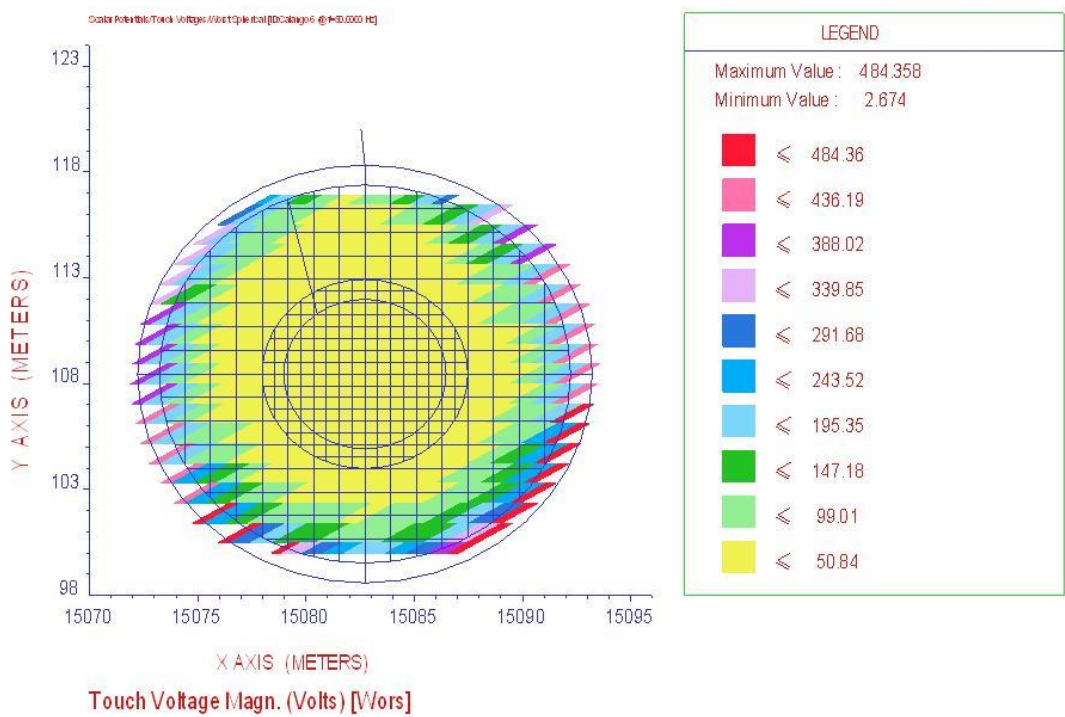
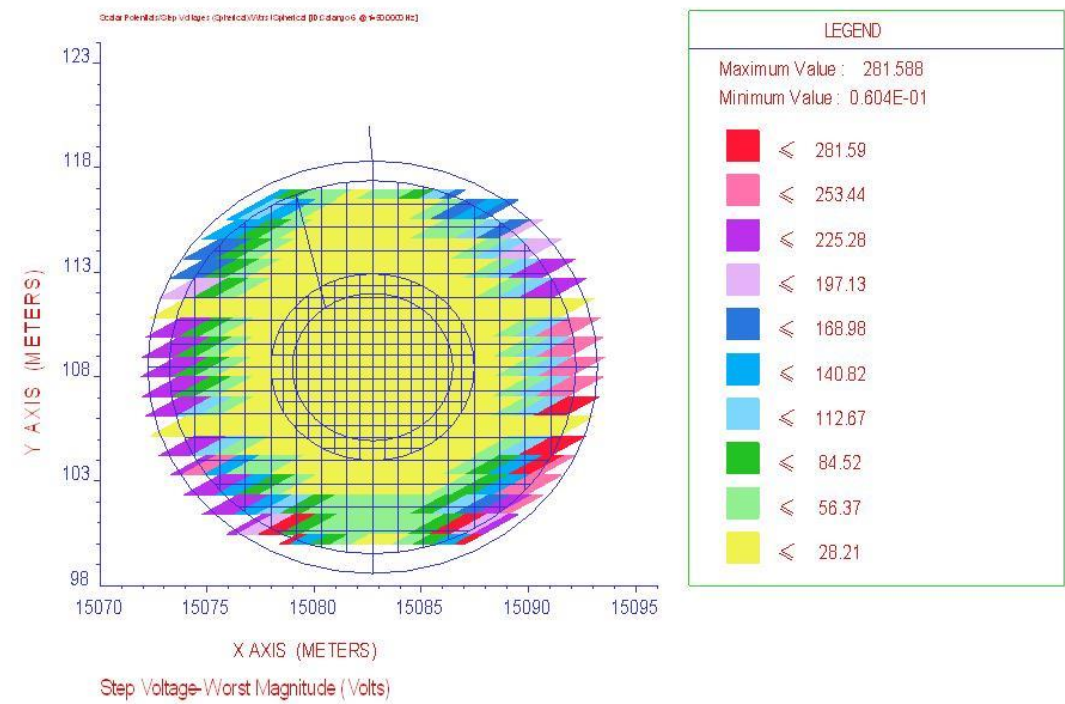
Turbina 11



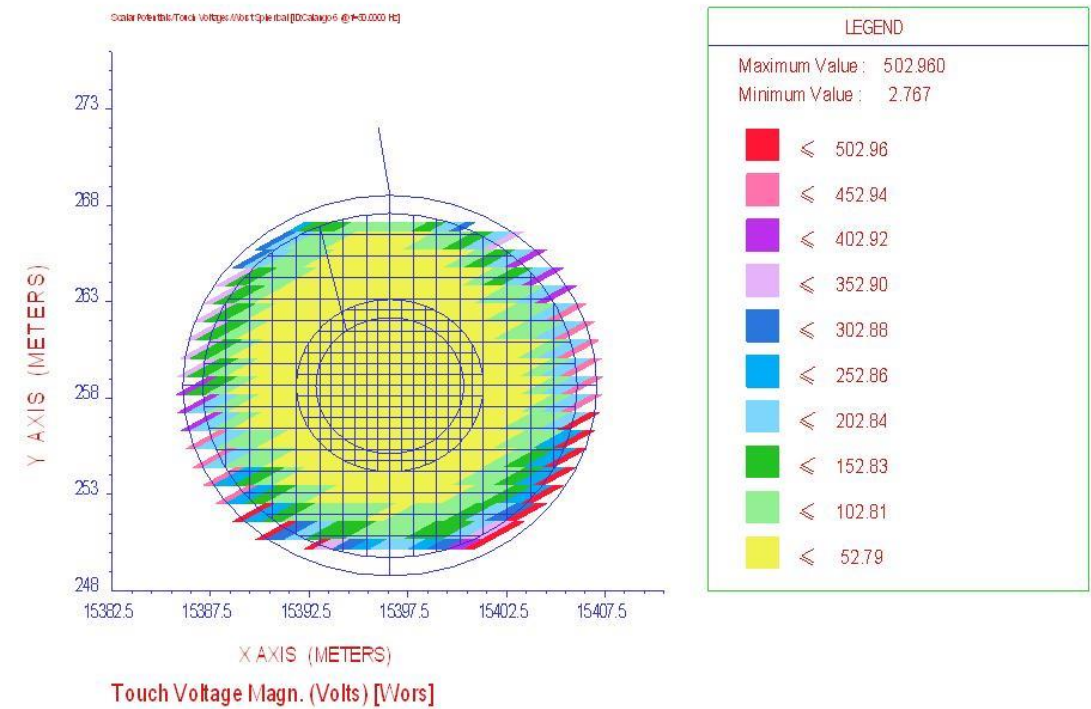
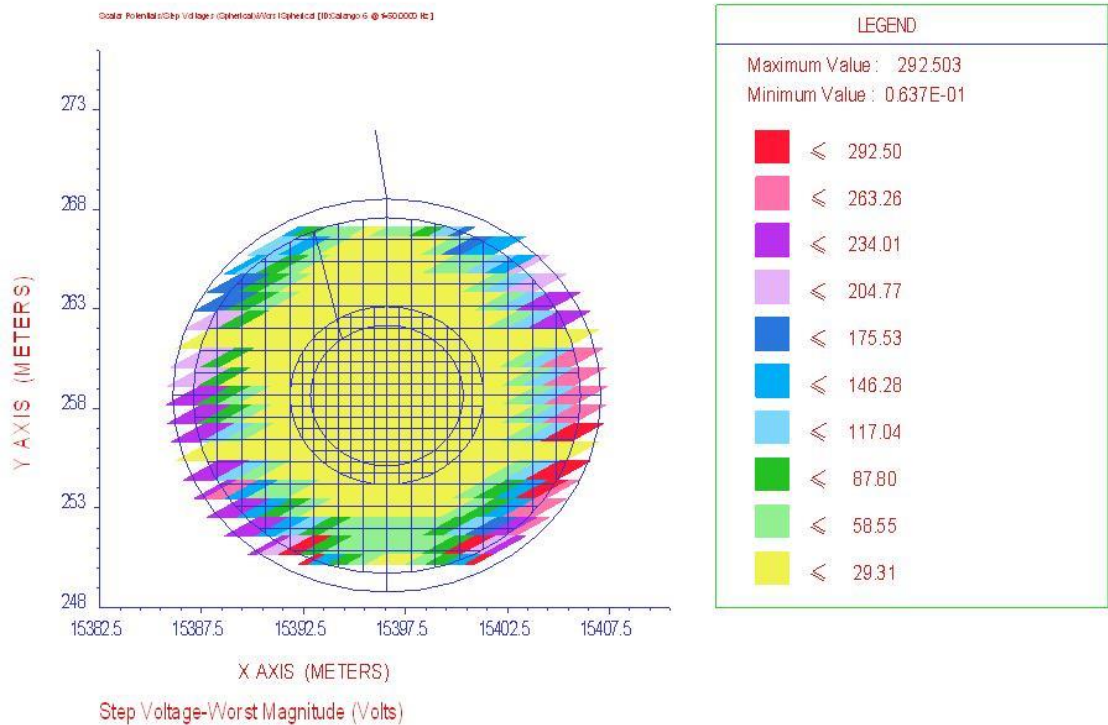
Turbina 12



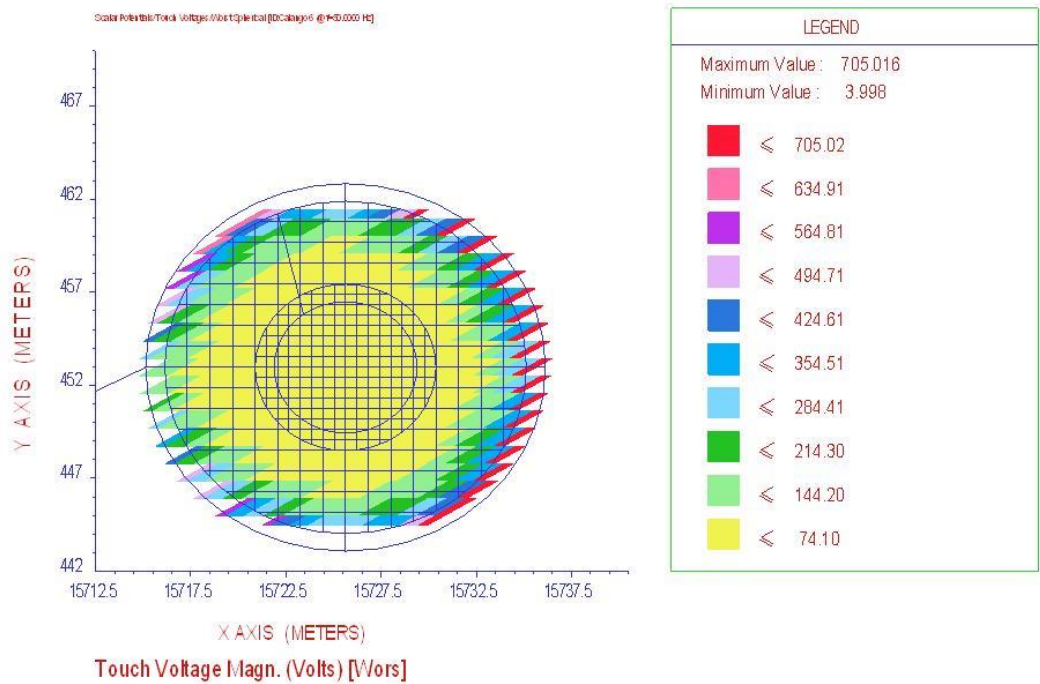
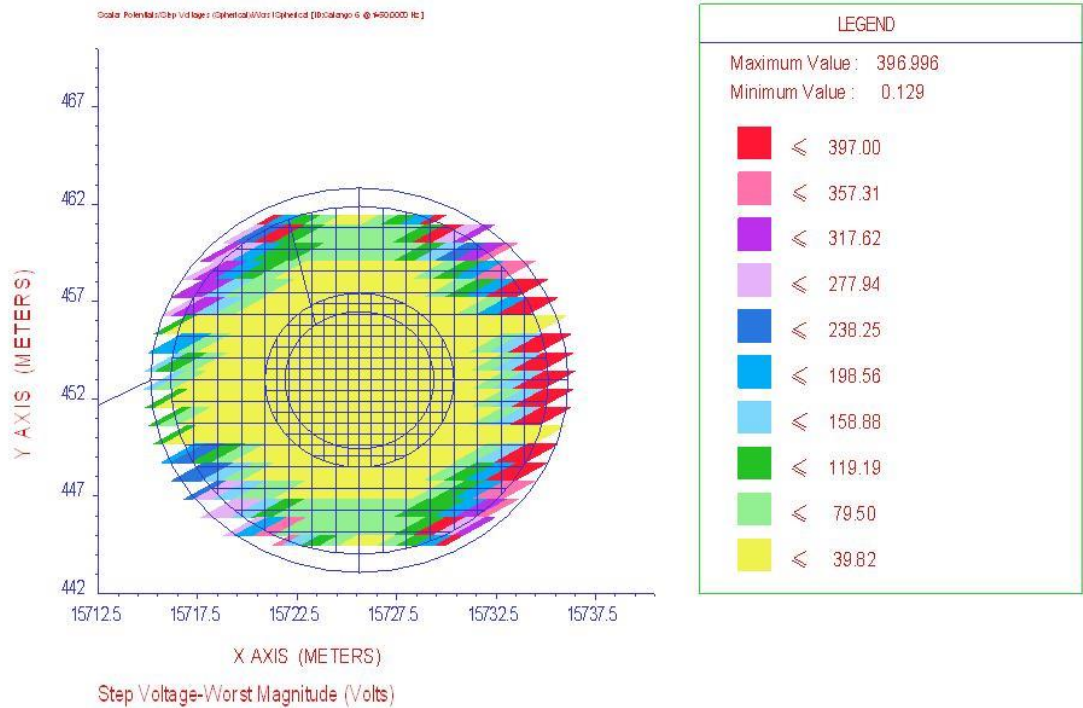
Turbina 13



Turbina 14

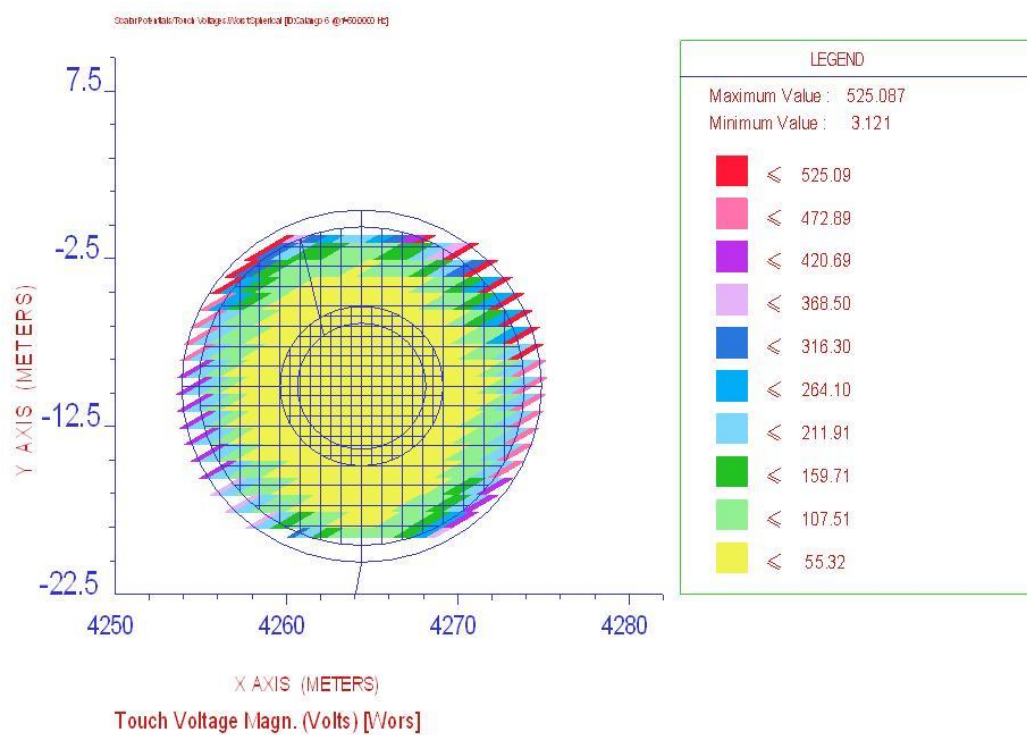
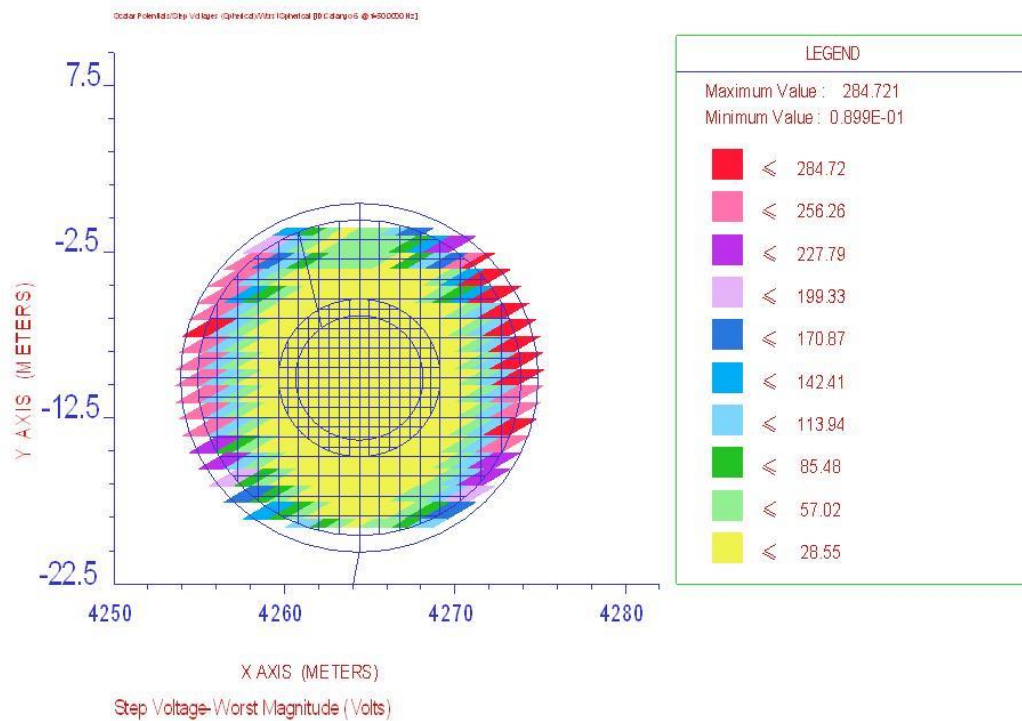


Turbina 15

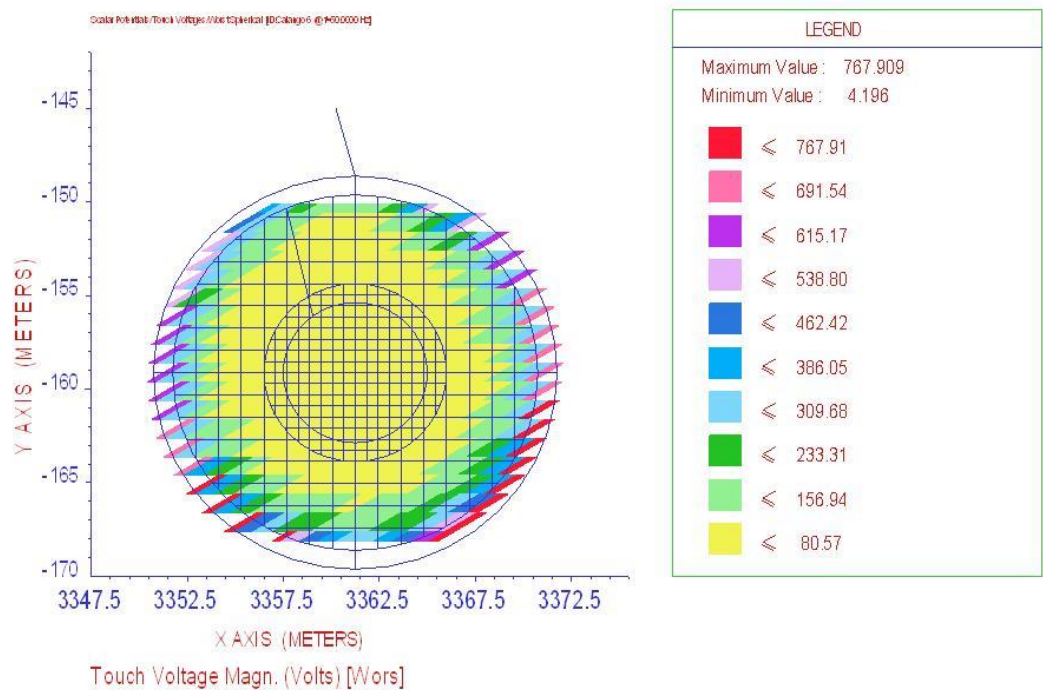
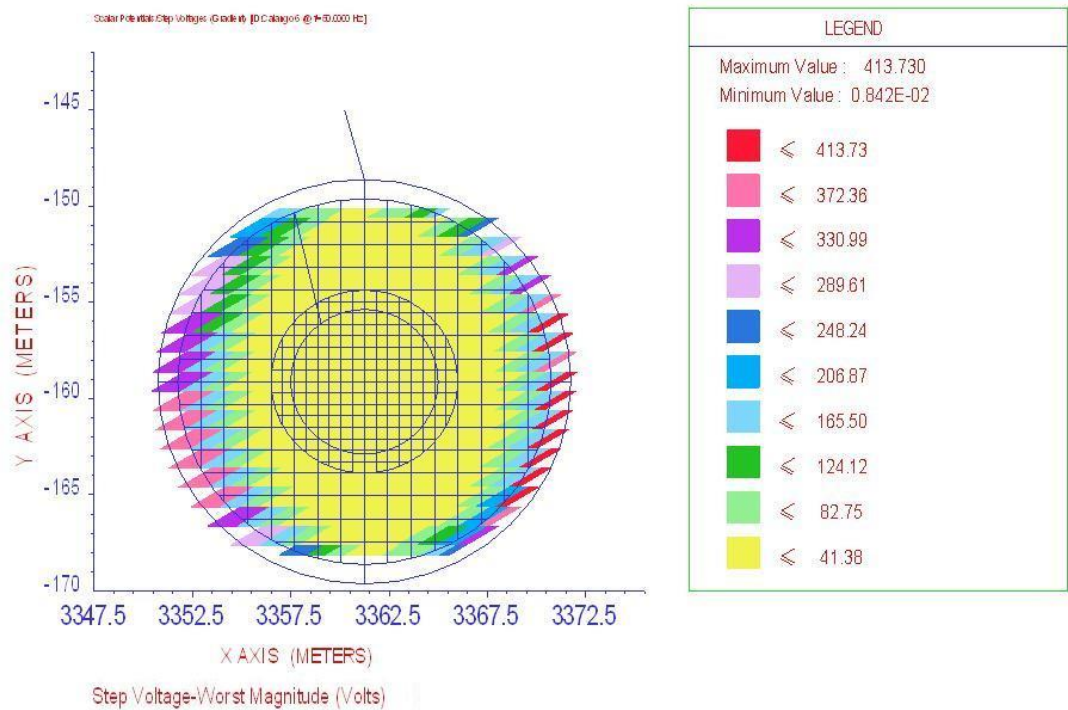


Parque eólico Santana II

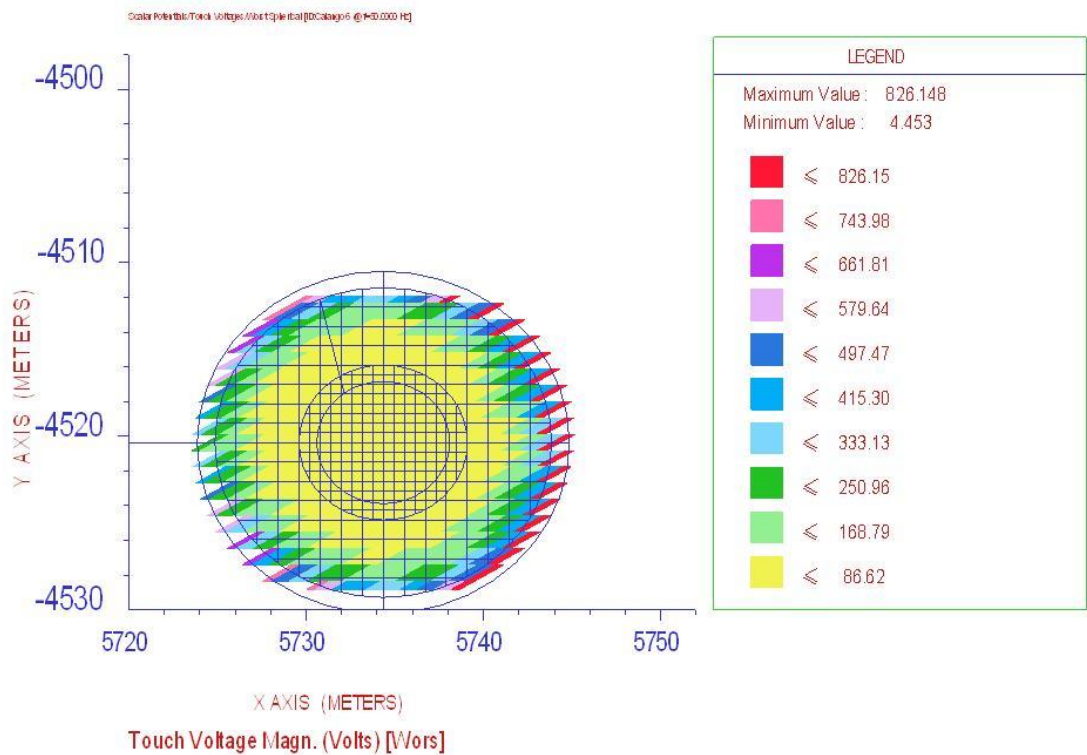
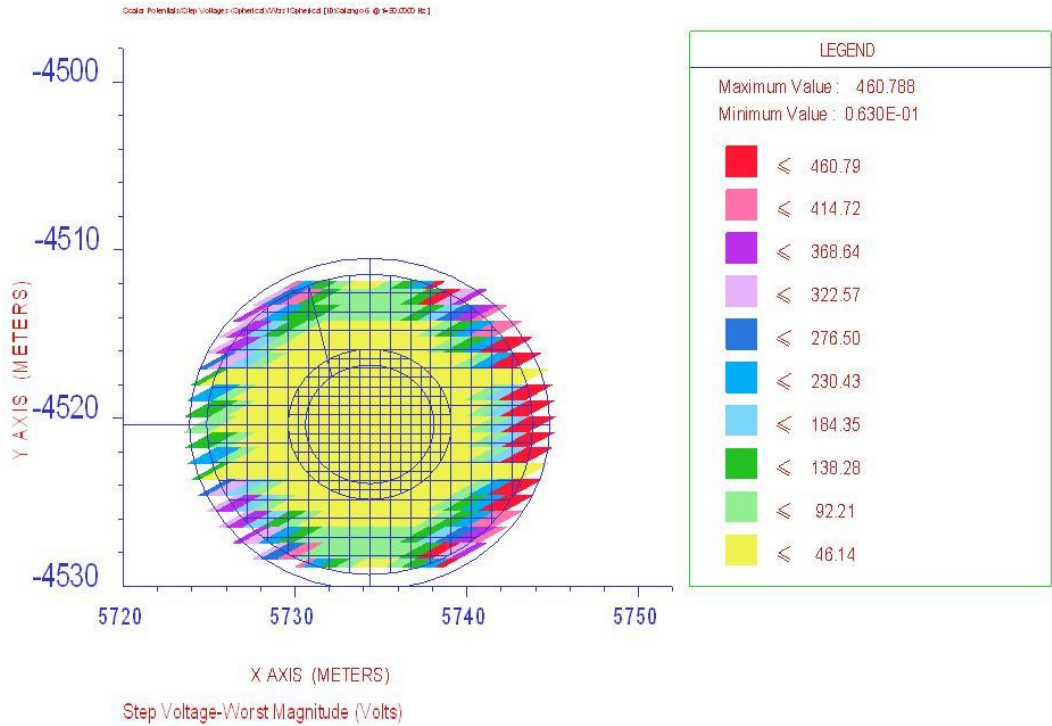
Turbina 1



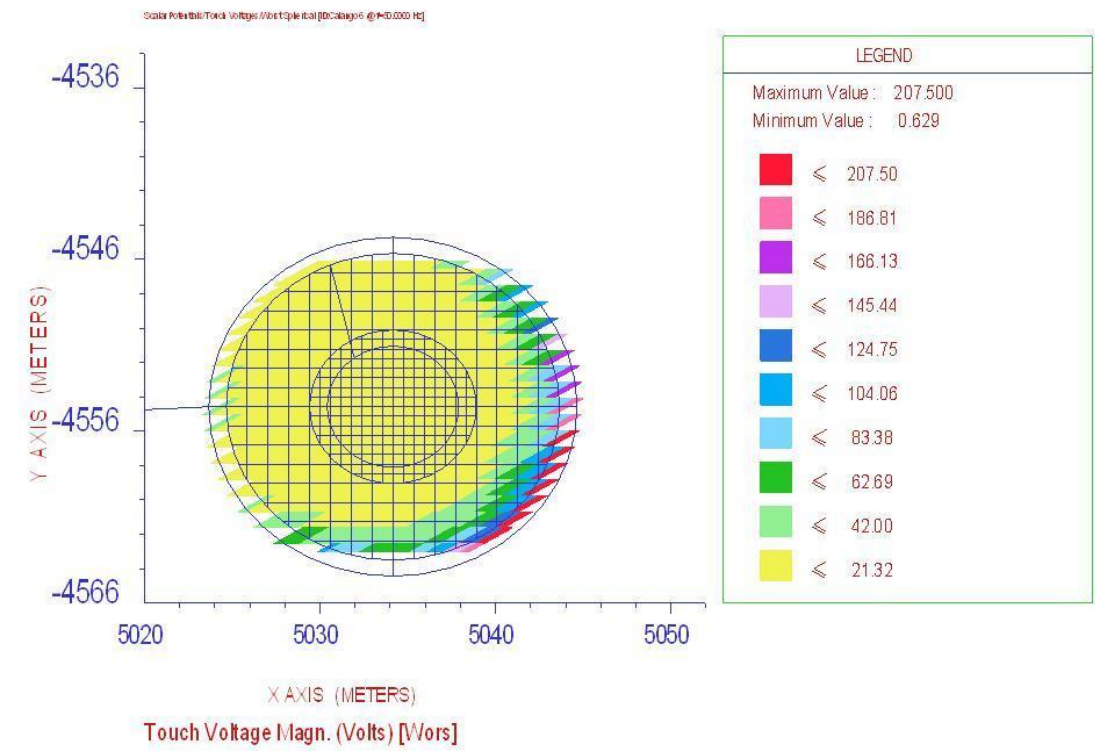
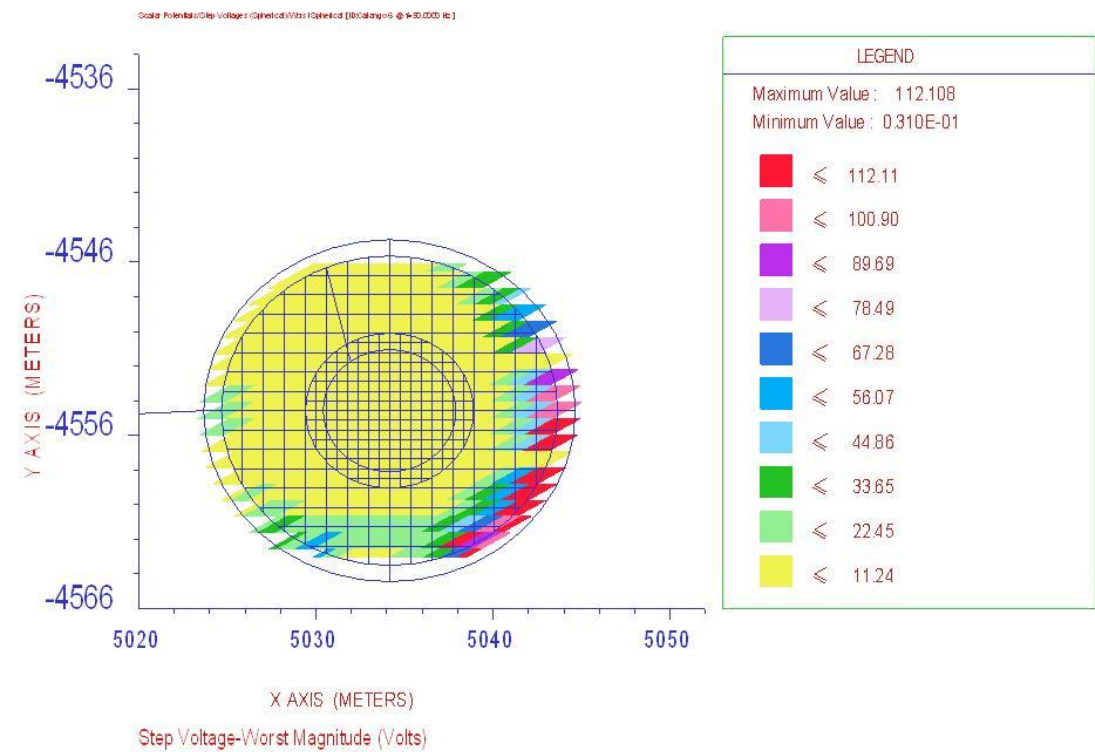
Turbina 2



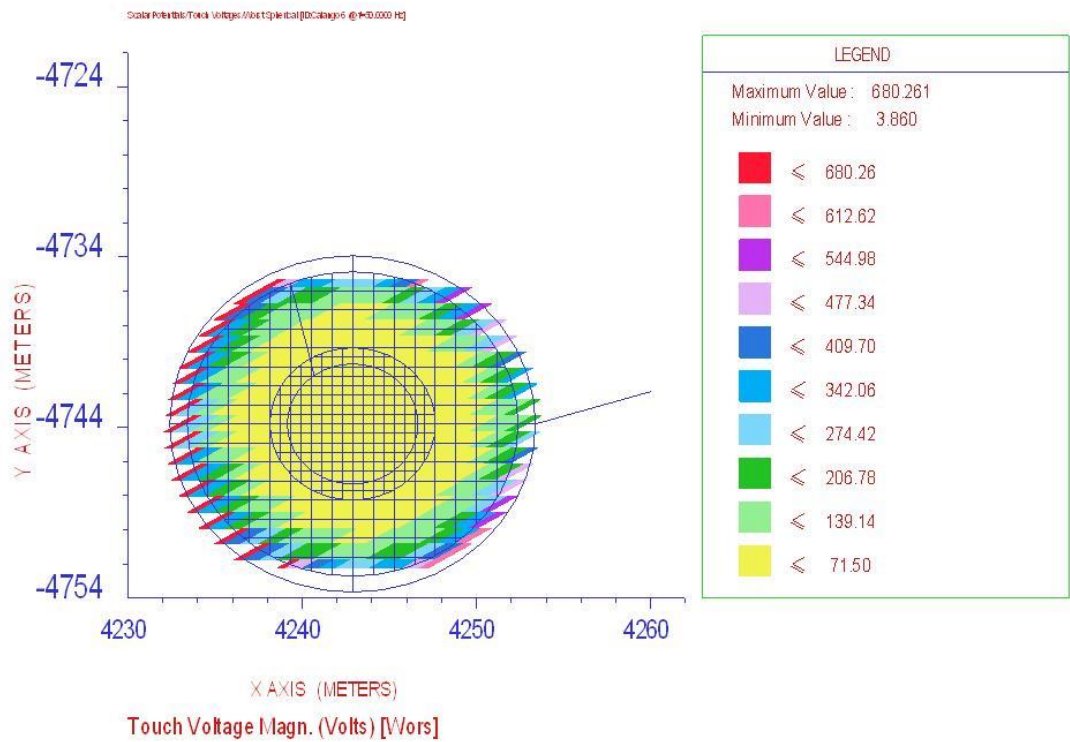
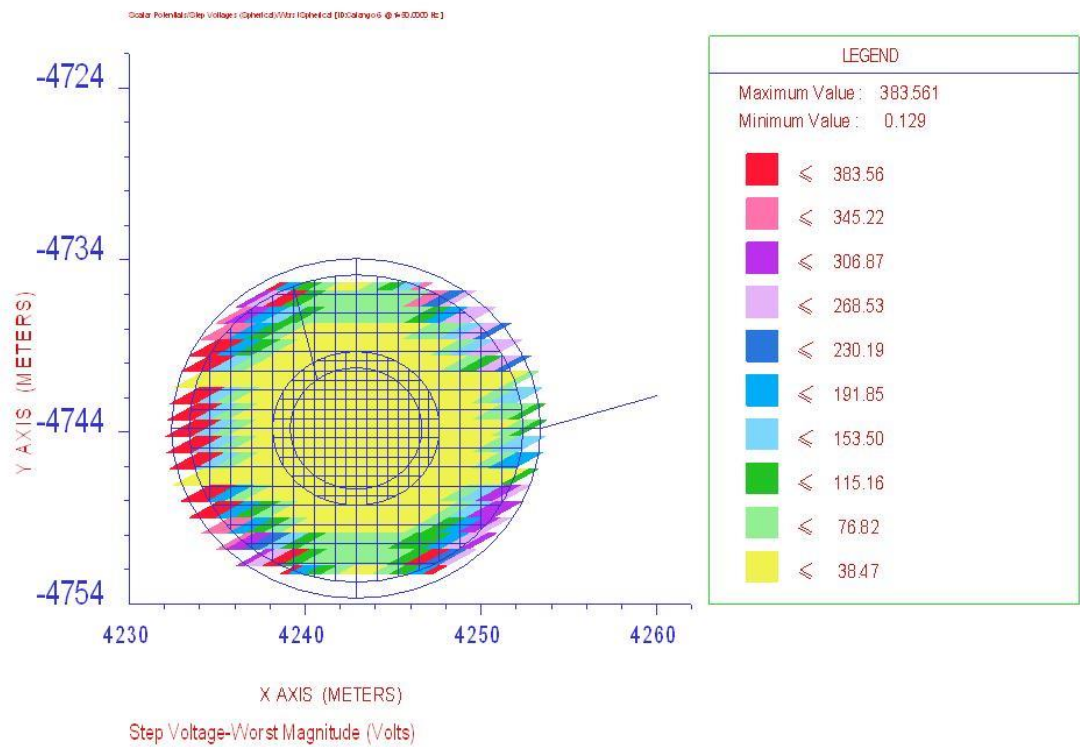
Turbina 3



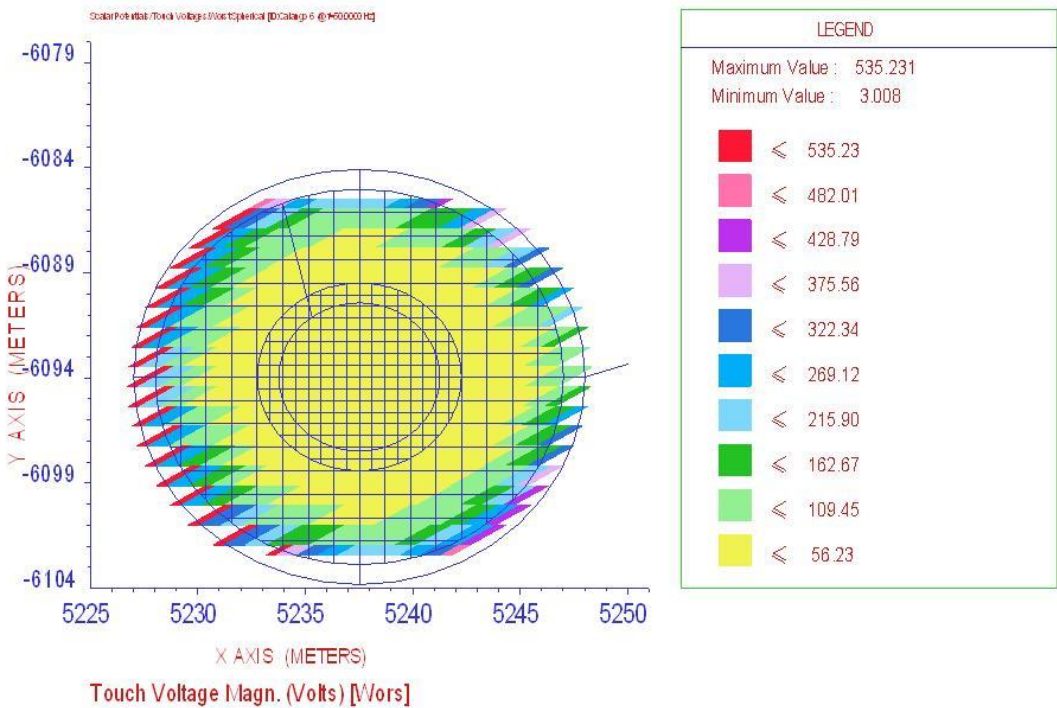
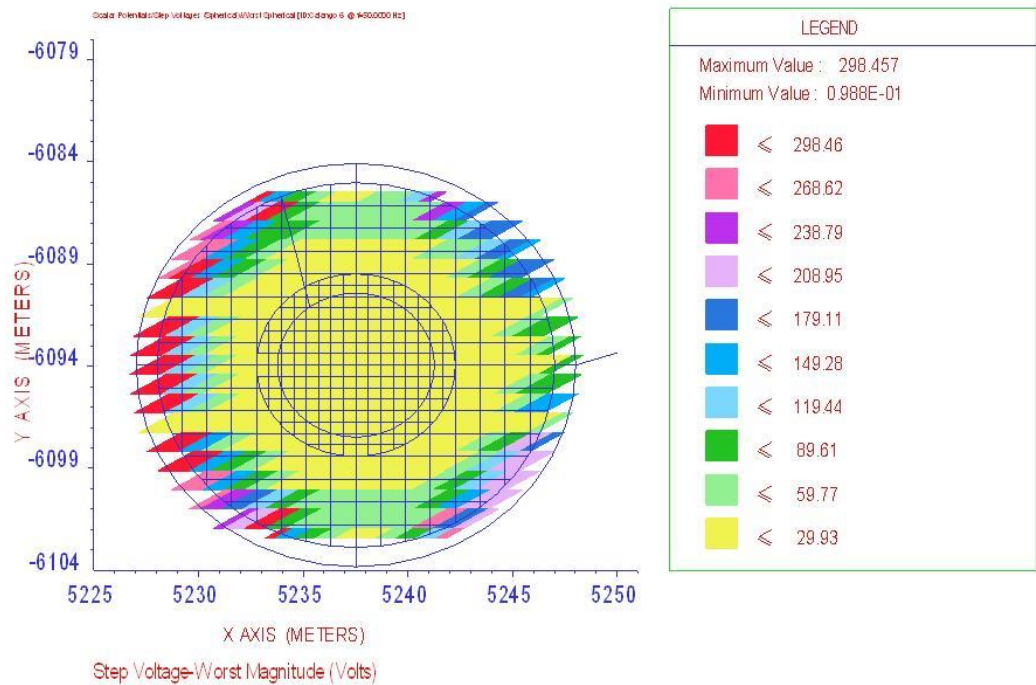
Turbina 4



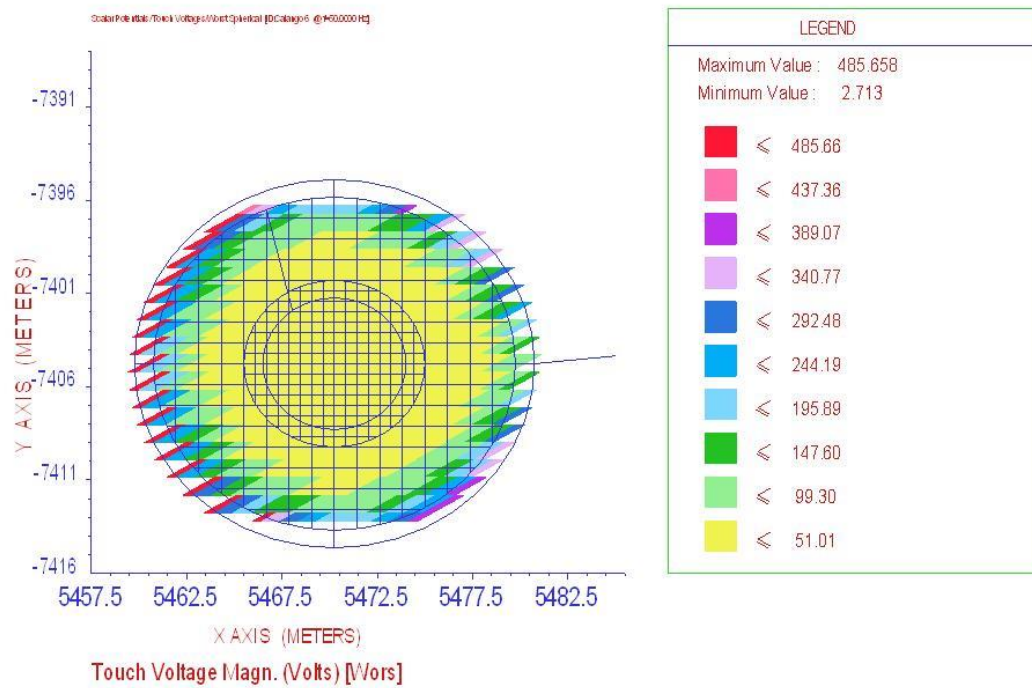
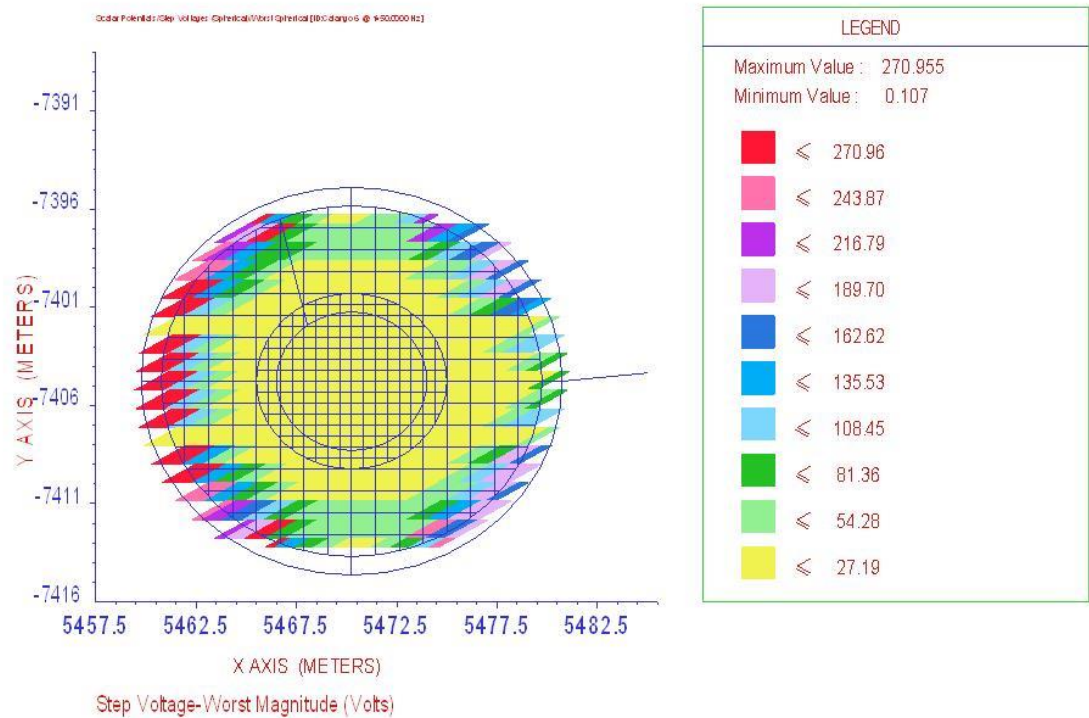
Turbina 5



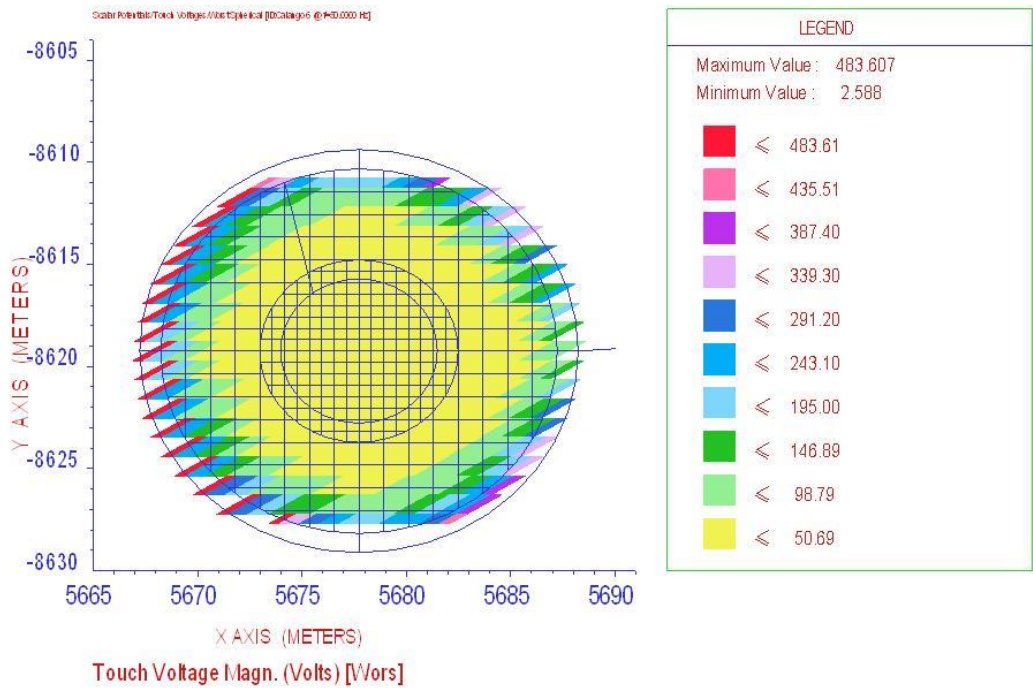
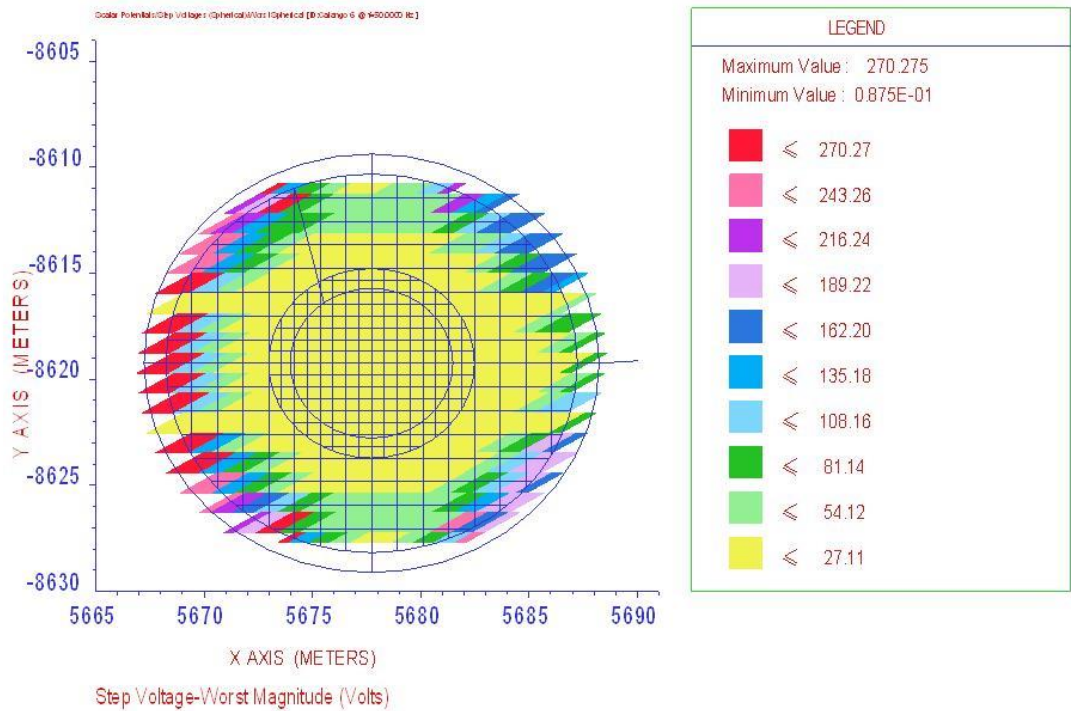
Turbina 6



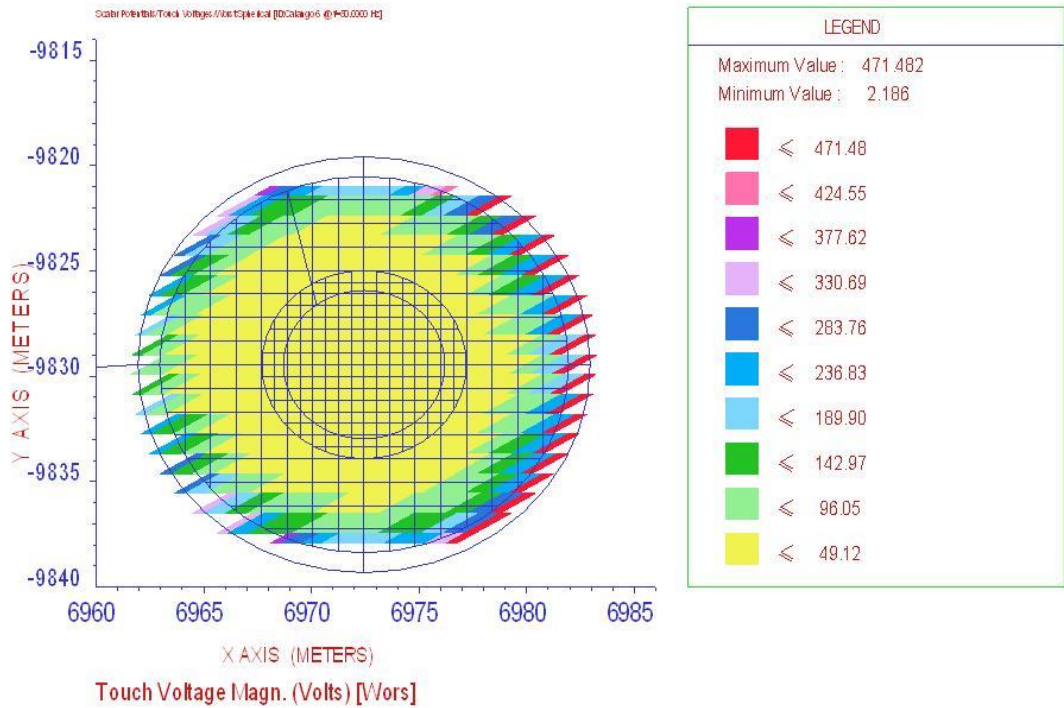
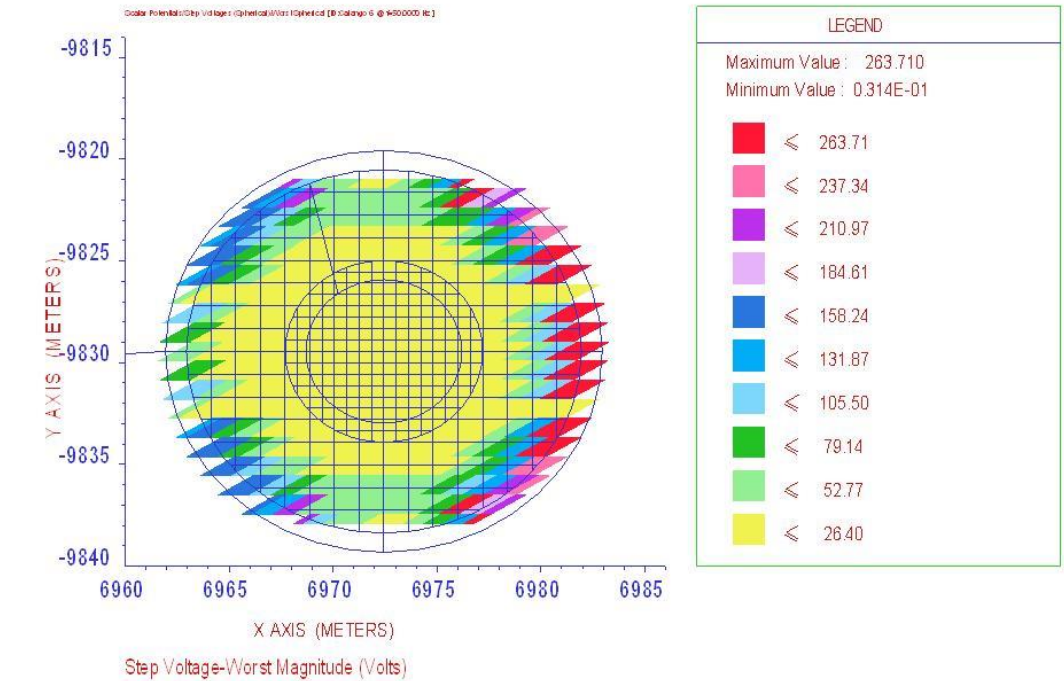
Turbina 7



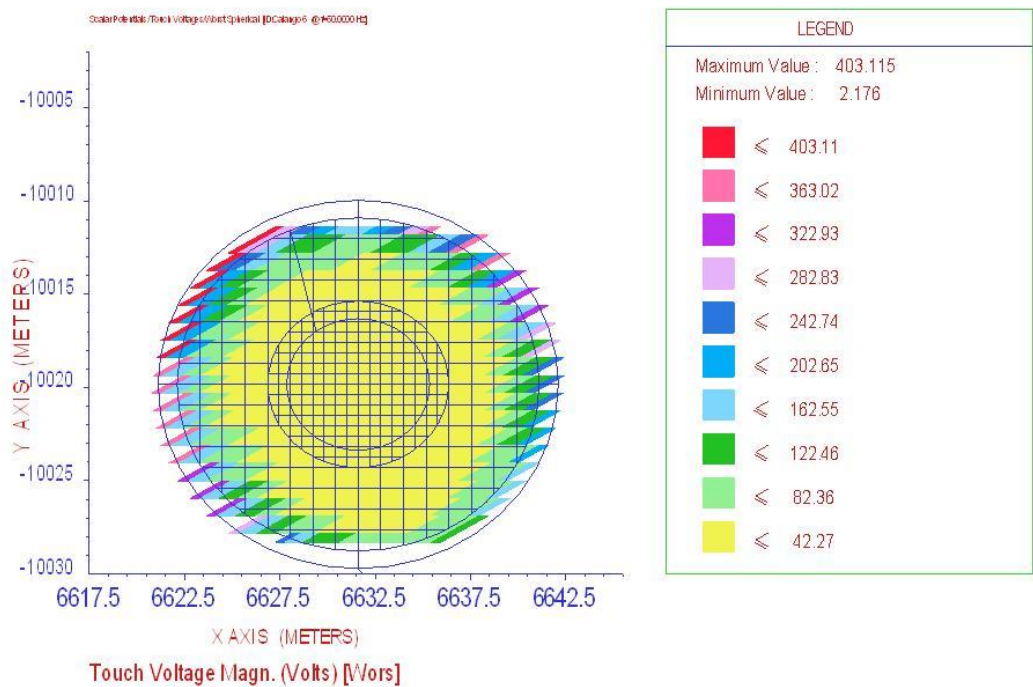
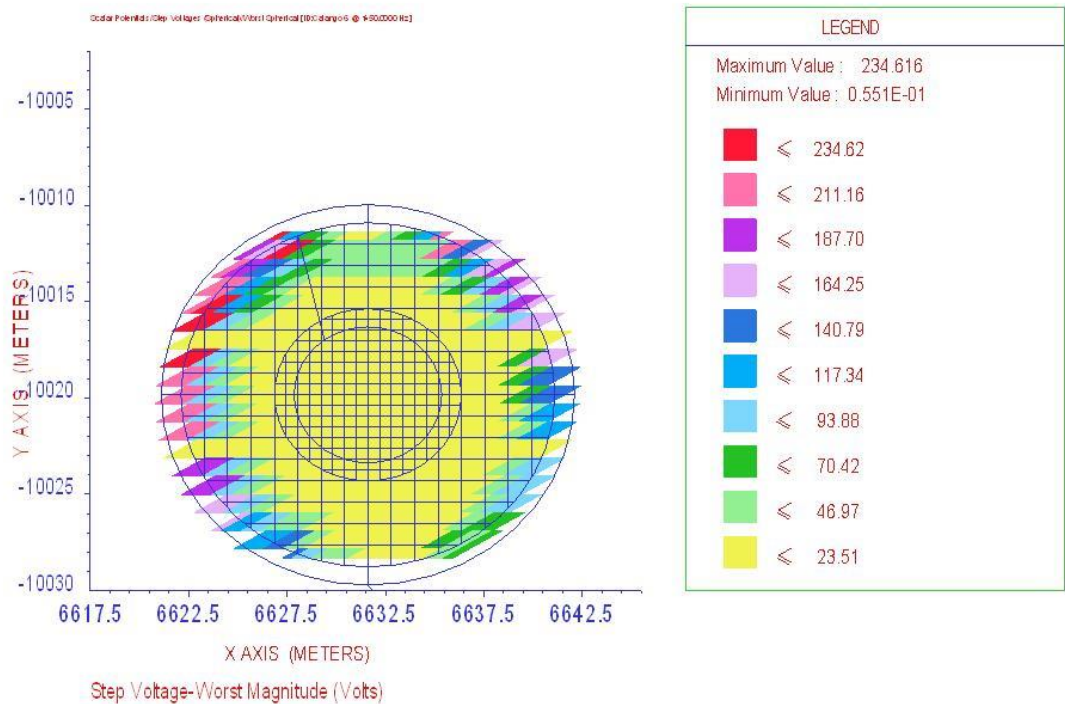
Turbina 8



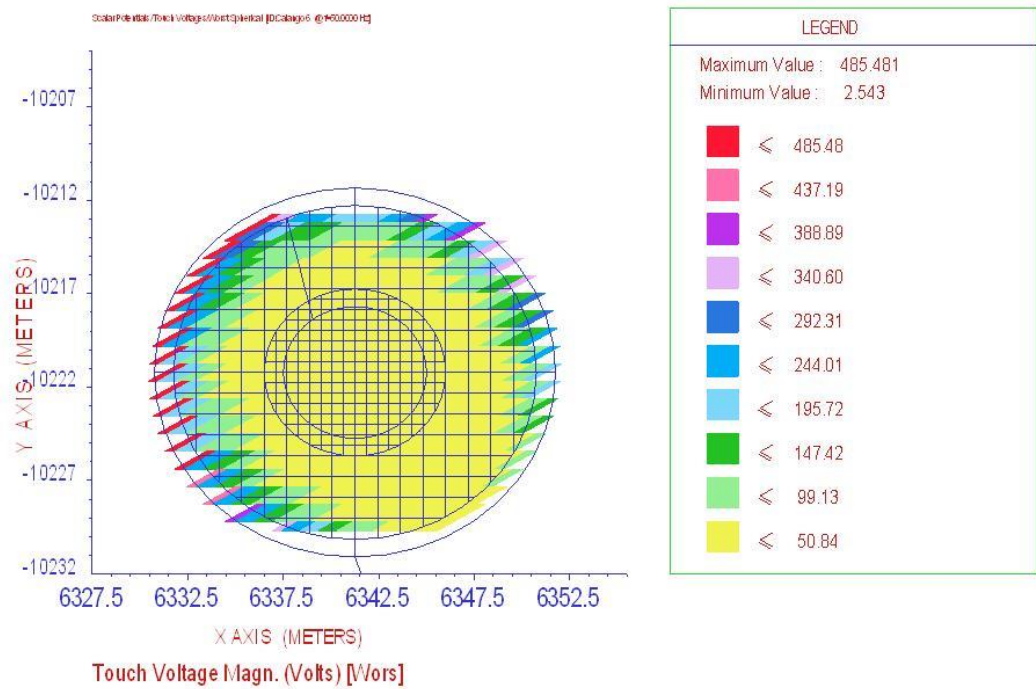
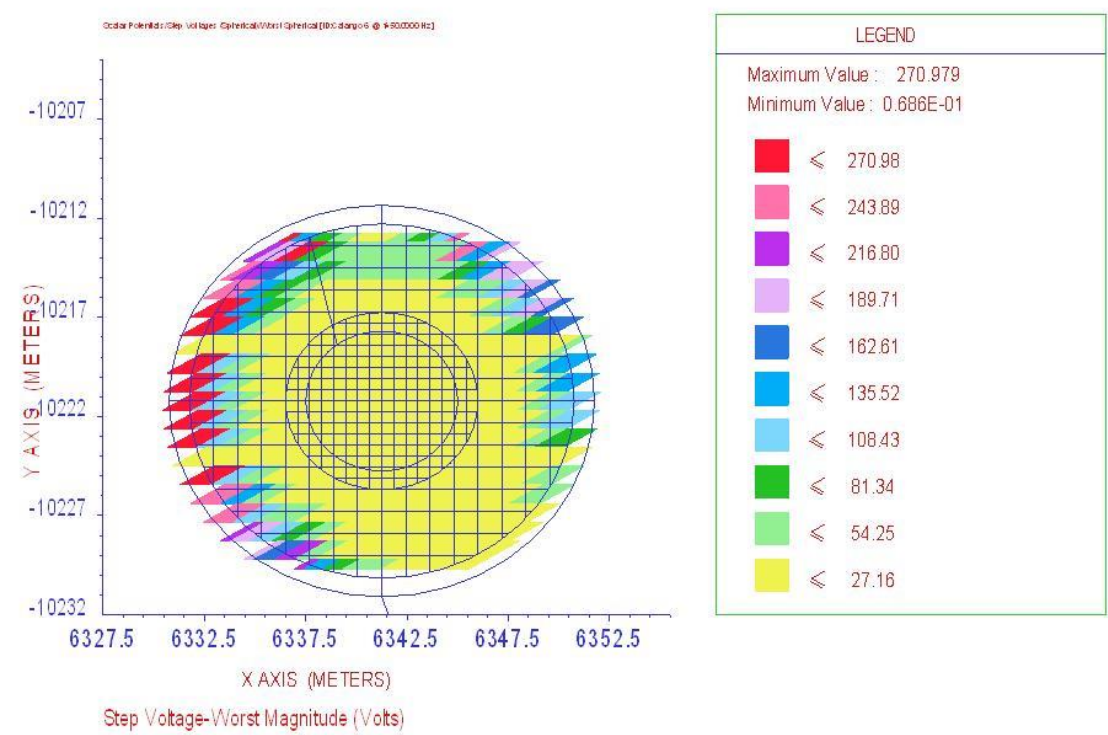
Turbina 9



Turbina 10



Turbina 11



Turbina 12

